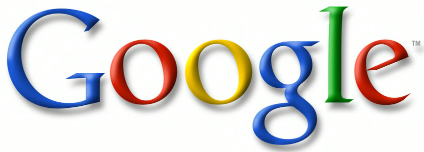
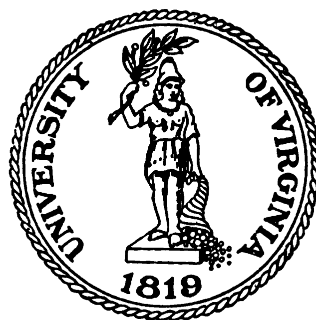



UNIVERSITY OF VIRGINIA
1819


Digitized by Google


BOOKS BOUND BY US ARE BOUND TO SATISFY
BOUND BY
CHAS. W. PRUFER
STAUNTON VA.

L'Éclairage Électrique

REVUE HEBDOMADAIRE DES TRANSFORMATIONS

Électriques — Mécaniques — Thermiques

DE

L'ÉNERGIE

La Lumière électrique.

L'Éclairage Électrique

REVUE HEBDOMADAIRE DES TRANSFORMATIONS

Électriques — Mécaniques — Thermiques

DE

L'ÉNERGIE

DIRECTION SCIENTIFIQUE

TOME XLVIII

3me TRIMESTRE 1906

ADMINISTRATION ET RÉDACTION

40, RUE DES ÉCOLES, 40

PARIS Ve

Tome XLVIII. Samedi 7 Juillet 1906. 13e Année. — N° 27.

L'Éclairage Électrique

REVUE HEBDOMADAIRE DES TRANSFORMATIONS

Électriques — Mécaniques — Thermiques

DE

L'ÉNERGIE

SUR QUELQUES EXPÉRIENCES DÉJA CONNUES, CONSIDÉRÉES AU POINT DE VUE DE LA THÉORIE DES ÉLECTRONS (1)

§ 1. — *Introduction.*

La plupart des expériences publiées par moi depuis 1872 et qui se rapportent à des phénomènes électriques m'ont été inspirées par certaines idées théoriques assez semblables à celles qui, aujourd'hui, sont acceptées par les physiciens, et qui ont conduit à la théorie de l'ionisation et des électrons.

A cette époque, déjà ancienne, on n'avait pas encore formulé l'hypothèse des ions dans les gaz ; lorsqu'on l'énonça un peu plus tard, elle n'eut pas l'approbation générale, peut-être parce qu'on ne savait pas alors expliquer d'une manière satisfaisante la formation de ions des deux espèces dans un gaz simple. Mais lorsque, plus tard encore, on eut reconnu l'existence d'électrons négatifs libres, et quand on eut compris que, par leur séparation des atomes neutres et leur successive réunion à d'autres atomes, les ions positifs et négatifs pouvaient se produire, la théorie de la conduction électrolytique des gaz apparût comme acceptable, et gagna en peu de temps une portée immense.

Or l'hypothèse, avec laquelle je me suis toujours guidé dans le passé, diffère de celle sur laquelle se base la théorie adoptée à présent en ce que, tandis que j'expliquais les phénomènes par le mouvement de molécules gazeuses, qui s'étaient électrisées soit en touchant des corps chargés, soit par leur choc contre des molécules déjà électrisées, on considère

(1) M. le Professeur Aug. Righi, de l'Université de Bologne, a bien voulu nous communiquer cette traduction de son mémoire ; le texte italien en sera prochainement publié dans les Mémoires de la Société des XL. N. D. L. R.

aujourd'hui les phénomènes comme produits par le mouvement d'ions créés par les causes d'ionisation connues, et, entre autres, par le choc des ions déjà existants contre les molécules neutres, lesquelles en effet, si le choc est assez énergique, se séparent en ions.

On expliqua généralement les brillantes expériences de Crookes sur la *matière radiante* en considérant les rayons cathodiques comme des ondulations spéciales de l'éther, et peu de personnes adoptèrent les idées de Crookes. Naturellement je me trouvai parmi ces dernières, car les idées du physicien anglais étaient identiques aux miennes, qui s'étaient même formées par généralisation de celles de Crookes.

Aujourd'hui les preuves accumulées en faveur de l'ionisation s'imposent tout à fait ; de plus, il serait très difficile de soutenir que les rayons cathodiques ne sont pas produits par des particules négatives douées d'un mouvement très rapide, ayant une masse beaucoup plus petite que celle des atomes. Mais les expériences antérieures ne perdent pas complètement leur intérêt ; beaucoup d'entre elles peuvent même servir d'illustration aux théories nouvelles. Aussi je crois qu'il est utile de passer en revue certaines de mes expériences anciennes, et d'en donner l'explication suivant la théorie des électrons. Pour cela il me suffira, dans la plupart des cas, de faire une espèce de traduction, et de substituer simplement à certaines expressions comme : *molécules gazeuses* ou *particules électrisées*, etc., des expressions telles que : *ions positifs* ou *négatifs, électrons,* etc.

Je suivrai à peu près l'ordre chronologique de mes publications, sauf lorsque cela m'obligerait à des répétitions inutiles. Mais, tout d'abord, je crois nécessaire une observation générale qui, bien que presque évidente, n'a encore été faite, que je sache, par aucun autre.

On explique aujourd'hui l'ionisation d'un gaz de la manière suivante. Un électron se sépare d'un atome, qui devient ainsi un ion positif ; l'électron reste libre ou bien (particulièrement si le gaz n'est pas raréfié) il s'attache à un autre atome neutre, qui devient ainsi un ion négatif. Il est même très probable que l'ion positif grandit en s'unissant à un atome neutre ; on expliquerait ainsi la mobilité plus petite des ions positifs par rapport aux ions négatifs. Il paraît même que dans certaines circonstances (par exemple lors de l'ionisation produite dans l'air par le phosphore) les ions sont des agrégations encore plus complexes.

De cette manière on aura des ions monovalents ; les bivalents se produiront par déplacement de deux électrons, et ainsi de suite.

Or on sait que les gaz composés s'ionisent eux aussi, et se comportent tout à fait comme les gaz simples, sans qu'il y ait la plus petite trace de décomposition chimique. Il faudra dès lors admettre, que l'ionisation (du moins pour les gaz composés) s'opère sur les molécules et non sur les atomes. S'il s'agit par exemple d'anhydride carbonique, les ions positifs seront des molécules qui ont été privées d'un électron (ou de plusieurs), et les ions négatifs seront des molécules avec un électron (ou plusieurs) en plus. Il peut se faire qu'il y ait des ions de cette espèce même dans le cas des gaz simples non mono-atomiques.

De cette observation on déduit, qu'en dernière analyse mon ancienne hypothèse diffère moins de celle qu'on adopte généralement qu'il n'apparaissait au premier abord. La seule différence importante réside dans l'origine des charges des molécules électrisées ou ions. Mais sur ce point il ne peut y avoir d'indécision, car la théorie électronique, qui est si simple et si compréhensive, mérite sans doute d'être préférée.

§ 2. — *Influence de la densité électrique des électrodes sur la décharge* (1).

Après avoir étudié, au moyen d'un électromètre de forme particulière qui permet de

(1) *Recherches expérimentales sur les décharges électriques.* Mem. della R. Acc. di Bologna, 11 maggio 1876. N. Cimento, serie 2, tome XVI.

mesurer la différence de potentiel entre deux électrodes au moment même de la décharge, l'influence du signe de la charge de chaque électrode (si les électrodes ont une courbure différente), j'eus l'occasion d'établir quelques faits nouveaux et d'en confirmer d'autres déjà connus, et entre autres celui de l'influence dont il s'agit ici.

Je trouvais en effet que la différence de potentiel nécessaire pour la décharge (ou potentiel explosif) dépend, toutes choses égales d'ailleurs, de la densité de l'électricité sur la surface des électrodes; si l'on augmente cette densité, le potentiel explosif devient plus petit, et on arrive, par exemple, à ce résultat en prenant comme électrodes des sphères de rayon de plus en plus petit.

De même j'établis que le potentiel explosif diminue lorsqu'on met une des électrodes en communication avec la terre.

MM. Wiedemann et Rühlmann avaient trouvé un résultat tout à fait contraire; mais cela dépend de leur méthode peu sûre de mesurer le potentiel explosif.

Ce phénomène rentre dans le précédent, car lorsqu'on met à la terre une des électrodes, la densité sur l'autre augmente beaucoup. En effet, cette densité dépend aussi de la différence de potentiel entre l'électrode et les corps environnants.

On peut faire des expériences concluantes, sans instrument de mesure, avec la très ancienne méthode de la *bifurcation* (fig. 1). Chacune des armatures A, B d'un condensateur communique avec deux électrodes, de manière que l'étincelle puisse se former soit en CD, soit en EF. Si les deux distances explosives sont à peu près égales, et si D et E sont de petites boules et C, F de grandes sphères, la décharge a lieu en EF lorsqu'on met à terre l'armature B, et en CD lorsqu'on met à terre l'armature A. La décharge a donc lieu là où la petite boule est isolée: c'est sur elle que l'augmentation de densité produite par la communication de l'autre électrode avec le sol est la plus prononcée.

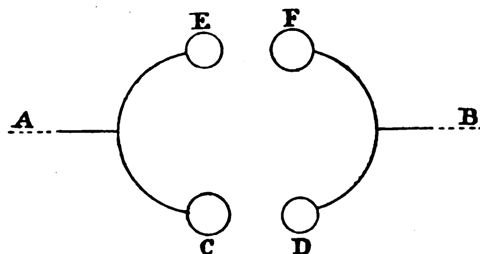


Fig. 1.

Ces expériences et quelques autres m'avaient été suggérées par la conception, que l'étincelle n'est que la phase finale d'un phénomène de mouvements accélérés des particules électrisées (nous dirons aujourd'hui, des ions) d'une électrode à l'autre. Pendant ces mouvements, les ions, par leur choc contre les molécules, en produisent d'autres. Le nombre des ions augmente donc de plus en plus rapidement jusqu'au moment où la violence du phénomène est telle que la lumière se produit.

Il semble donc naturel, qu'une densité électrique plus grande sur les électrodes, et par conséquent une plus grande intensité du champ près des électrodes doive rendre plus rapide le phénomène de mouvement des ions et d'ionisation qui prépare l'étincelle.

J'ai observé des faits semblables, bien que moins prononcés, en employant quatre sphères C, D, E, F de même diamètre, dont deux D, E, formées par un métal et les deux autres C, F par un métal différent. Cette influence de la nature des électrodes se manifeste dans tous les cas [1], même dans la production de l'effet de soupape électrique avec des électrodes de même diamètre et de différente nature. Cela s'explique en admettant, ce qui est très

[1] Dans son beau livre: *Conduction of Electricity through Gases* (page 353), M. J.-J. Thomson dit qu'avec des électrodes de différentes substances, j'ai trouvé toujours la même valeur pour le potentiel explosif. Il y a là un malentendu, car c'est exactement le contraire qui est vrai.

vraisemblable, que les électrons détachés de la cathode par les ions positifs, sortent avec des vitesses différentes et en nombre variable suivant la nature de la cathode.

§ 3. — *Décharges lumineuses dans les liquides.*

Si dans le circuit de décharge d'un condensateur l'on introduit de l'eau, ou une solution saline, de l'alcool, de l'éther, etc. au moyen d'électrodes qui présentent une très petite surface de contact avec le liquide, et si l'on réserve dans la partie métallique du circuit une interruption pour l'étincelle, on observe à chaque décharge de beaux phénomènes lumineux sur les électrodes (1), qui rappellent un peu ceux présentés dans l'air par des pointes aiguës.

Si la distance entre les électrodes est assez grande, chacune montre un phénomène distinct. Celui qui se forme sur l'électrode positive est formé par des filets lumineux ondulés et divergents : sur l'électrode négative les aigrettes sont plus courtes et plus nombreuses. Si l'on approche les électrodes l'une de l'autre, ou si on augmente la longueur de l'étincelle dans l'air (et par conséquent le potentiel) les deux phénomènes lumineux se joignent et enfin on obtient dans le liquide une étincelle.

Le phénomène suivant présente un intérêt particulier. Soient deux grandes masses liquides, chacune avec un électrode, et communiquant entre elles par un canal très court et très étroit. Au moment de la décharge on observe aux extrémités du canal des phénomènes lumineux en même temps que sur les électrodes ; sur le bout du canal tourné vers l'électrode négative on voit des filets lumineux identiques à ceux d'une électrode positive ; sur l'autre bout, on voit le phénomène caractéristique d'une électrode négative. Le résultat est donc de tout point semblable à celui que l'on observe dans un gaz raréfié contenu dans un tube ayant un étranglement (2).

L'analogie entre les décharges lumineuses dans les liquides et celles dans les gaz est si complète, qu'on ne peut se refuser à supposer que le mécanisme de leur formation soit le même. En faveur de cette opinion il existe un fait bien démontré, l'augmentation de conductibilité électrique présentée par certains liquides exposés aux rayons du radium (3).

Il faudra donc admettre une ionisation par choc même dans les liquides, partout où le champ électrique aura une intensité suffisante ; il y aura ainsi production de plus en plus rapide d'ions nouveaux. Comme il s'agit ici, non de la dissociation électrolytique spontanée, dans laquelle le signe de charge d'un ion dépend de sa nature chimique (par exemple, on ne trouve pas dans l'eau d'ions d'hydrogène négatifs), mais d'un phénomène qu'on peut considérer comme étant de nature mécanique, il pourra se faire que suivant les circonstances de chaque choc un ion de nature donnée soit positif ou négatif (par exemple des ions d'hydrogène négatifs pourront se former dans l'eau). De là, cette conséquence naturelle, que sur chacune des électrodes on peut recueillir un mélange d'oxygène et d'hydrogène, ce que j'ai constaté par expérience lors de mes recherches.

§ 4. — *Trajectoires parcourues par les ions.*

Ayant toujours eu la conviction que les rayons cathodiques étaient constitués par des particules électrisées en mouvement, il était pour moi tout naturel de considérer toute décharge

(1) *Recherches expérimentales sur les décharges électriques*, 2e Mémoire. Mem. della R. Acc. di Bologna, 4 febbr. 1877. — *Sur la photographie des étincelles électriques, particulièrement de celles produites dans l'eau.* Rend. della R. Acc. dei Lincèi (1835), page 459.

(2) A cette époque (1877) j'ai observé des phénomènes semblables (voir le Mémoire cité) avec de forts courants de piles, c'est-à dire ces phénomènes mêmes qui sont utilisés aujourd'hui dans l'interrupteur de Wehnelt (électrode positif de petite surface) et dans ceux de Simon, Caldwell et Turpain (deux masses liquides communiquant par un petit canal).

(3) Rend. della R. Acc. dei Lincèi, tome XIV, page 207 (1905).

comme un phénomène de convection. Ainsi la décharge par une pointe électrisée a toujours été pour moi constituée par des particules électrisées par la pointe et repoussées par elle. Cela correspond aux idées modernes, car l'ionisation par choc a lieu près de la pointe, de manière que tout l'espace compris entre la région d'ionisation et la plaque métallique, qui fonctionne comme deuxième électrode, soit parcouru seulement par des ions allant vers la plaque, et dont le signe de charge est le même que celui de la pointe.

Ainsi, dès que j'eus connaissance des expériences de Hittorf, Goldstein et Crookes, dans lesquelles on observait l'ombre électrique, j'eus l'intuition qu'on pourrait réaliser un phénomène analogue dans l'air à la pression ordinaire au moyen d'une pointe (¹). Ce phénomène se réalisa parfaitement dès les premiers essais, et de plusieurs manières. Voici les deux principales :

a) La pointe métallique est verticale et tournée vers le bas, où se trouve une plaque métallique horizontale, qui joue le rôle de deuxième électrode. Entre cette plaque et la pointe se trouve une petite croix d'ébonite. On place sur la plaque une feuille de carton sur laquelle on a déposé une mince couche de poudre métallique ; dès qu'on établit une différence de potentiel entre les deux électrodes on voit l'ombre de la croix se dessiner. En effet la poudre est complètement chassée de la région que la croix protège contre le bombardement des ions provenant de la pointe, tandis que, dans la partie restante du carton, les particules métalliques, continuellement déchargées par les ions, retombent aussitôt.

b) On place sur la plaque métallique une lame d'ébonite, dont la surface inférieure porte une armature de feuille d'étain. Après avoir provoqué une étincelle entre une sphère communiquant avec la pointe et l'armature intérieure d'une petite bouteille de Leyde chargée (dont l'armature extérieure communique avec la plaque et avec le sol) on retire l'ébonite, et on projette sur sa face supérieure le mélange normal de minium et de soufre.

J'obtins plus tard des ombres électriques semblables au moyen des ions négatifs repoussés par un corps sur lequel tombaient des radiations ultraviolettes (²), ou par un fil métallique chauffé au rouge (³), ou enfin avec les ions produits par une flamme (⁴), par les rayons de Röntgen (⁵) ou par les substances radio-actives (⁶).

Les électrons émis par la cathode d'un tube de Crookes, qui forment les rayons cathodiques, parcourent des trajectoires sensiblement rectilignes. Pour les ions dans l'air à la pression ordinaire il n'en est pas toujours ainsi. Les trajectoires des ions sont encore rectilignes dans le cas de deux électrodes planes et parallèles ; mais, généralement, la direction du mouvement d'un ion change continuellement, car la direction de la force électrique est généralement variable d'un point à l'autre. En outre, on doit admettre que la vitesse d'un ion varie brusquement en grandeur et direction chaque fois qu'il choque un autre ion ou une molécule gazeuse, et par conséquent la trajectoire sera certainement une ligne brisée. Chacun des traits continus de cette ligne sera très court (petite fraction de millimètre) dans le cas de l'air à la pression atmosphérique. Et comme dans la plupart des chocs l'ion devra perdre, en grande partie, la vitesse que la force électrique lui avait communiquée

(¹) *Les ombres électriques.* Mem. della R. Acc. di Bologna, 12 maggio 1881, 15 aprile 1882. — N. Cimento, 3ª serie, tome II, page 123.

(²) *Sur les phénomènes électriques produits par les radiations.* Mem. della R. Acc. di Bologna, 11 nov. 1888. — Atti del R. Ist. Veneto, tome VII (1889). — N. Cimento, 3ª serie, tome XXIV, page 256.

(³) *Sur la convection électrique.* Rend. della R. Acc. dei Lincèi, 1889.

(⁴) *Ibid.*

(⁵) *Sur la propagation de l'électricité dans les gaz traversés par les rayons de Röntgen.* Mem. della R. Acc. di Bologna, 31 maggio 1896.

(⁶) *Expériences de démonstration sur la radio-activité.* Rend. della R. Acc. di Bologna, 29 maggio 1904.

depuis le choc précédent, il se dirigera après le choc à peu près suivant la direction du champ. La ligne brisée parcourue par l'ion devra donc s'éloigner très peu d'une ligne de force.

On démontre par expérience que les trajectoires des ions coïncident pratiquement avec les lignes de force, en choisissant des champs électriques bien connus, tels que le champ produit par des conducteurs cylindriques ou plans, parallèles entre eux. Les lignes de force sont des cercles, que l'on sait construire; on trouva par différentes méthodes, que les trajectoires des ions coïncidaient exactement avec ces cercles.

Il restait à examiner les cas intermédiaires entre celui du tube de Crookes et celui des ombres à la pression ordinaire. Pour combler cette lacune, je fis des expériences avec des conducteurs cylindriques, contenus dans un récipient où l'on pouvait faire le vide. La figure 2 donne le schéma de mon appareil. Z est une cathode cylindrique de zinc entièrement vernie, sauf suivant une de ses génératrices *a*. L'anode L est une lame plane, près de la surface de laquelle on a fixé des fils de platine isolés f_1, f_2... qu'on peut mettre tour à tour en communication avec un électromètre. Enfin Q est une plaque de quartz qui ferme l'appareil, et qui laisse passer les radiations ultraviolettes qui doivent arriver sur *a*.

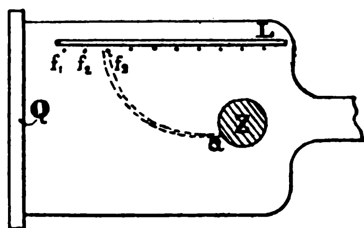


Fig. 2.

Au moyen de l'électromètre on pourra reconnaître le lieu d'arrivée des ions négatifs émis par la génératrice *a*, à laquelle on donne des positions diverses en tournant Z autour de son axe. On trouva ainsi que, lorsqu'on diminue la pression, les trajectoires, qui d'abord sont les arcs de cercle bien connus (par exemple af_3), deviennent graduellement moins courbées, et tendent à devenir rectilignes pour les grandes raréfactions [1].

On peut donc dire que l'étude de la forme des trajectoires parcourues par les ions dans les gaz était déjà accomplie, bien avant que la théorie actuelle ne fut énoncée, d'une manière claire et assez complète.

§ 5. — *Étincelles dans un champ électrique transversal.*

Une série d'expériences de 1881 donnent la confirmation [2] de l'existence d'un mouvement d'ions qui précède et prépare l'étincelle, comme on l'a dit dans le paragraphe 2. Dans ces expériences, deux électrodes A, B (fig. 3), entre lesquelles éclataient les décharges d'un condensateur, étaient placées entre deux grands disques parallèles C, D, chargés en permanence d'électricités de signes contraires par une machine électrique; de préférence, cette machine était absolument indépendante de celle qui fournit les charges au condensateur.

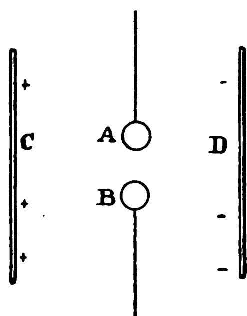


Fig. 3.

Dans ces conditions les étincelles ne sont plus rectilignes; elles se courbent du côté de C ou du côté de D. Ce changement de forme est accompagné d'ordinaire d'un changement de place des extrémités de l'étincelle sur les électrodes A, B. Le phénomène devient surtout très évident lorsque, en introduisant une colonne d'eau dans le circuit de décharge, on rend celle-ci non oscillante et de plus longue durée. Voici les considérations,

(1) *Sur la convection photo-électrique*, etc. Mem. della R. Acc. di Bologna, 27 aprile 1890.

(2) *Déplacements et déformations des étincelles*, etc. Mem. della R. Acc. di Bologna, 12 maggio 1881.

presque identiques à celles qui me firent prévoir ce phénomène, et avec lesquelles on peut aujourd'hui l'expliquer.

Le mouvement des ions entre les électrodes, qui précède l'étincelle, n'est pas toujours symétrique ; souvent les ions d'une espèce sont plus abondants dans une partie de l'espace, que ceux d'espèce contraire. On sait par exemple que si l'électrode A est une pointe et B une lame plane, l'ionisation par choc des ions déjà formés a lieu près de A, et que presque tout l'espace entre A et B est ainsi parcouru seulement par des ions du signe de A et qui se meuvent dans le sens de A vers B. Une dissymétrie analogue aura lieu si, simplement, la densité électrique sur A est plus grande que sur B, par exemple lorsque A est isolé et B en communication avec le sol, ou bien lorsque la courbure de la surface de A est plus grande que celle de B. Dans les cas de cette espèce, bien que le champ transversal tende à produire des déviations de sens contraires sur le chemin des ions des deux espèces, l'action produite sur ceux qui partent de A sera prépondérante ; dès lors le phénomène de convection qui prépare l'étincelle devra subir, dans son ensemble, un déplacement vers C ou vers D, suivant que la charge de A est négative ou positive.

On peut exprimer tout cela d'une autre manière en disant que les trajectoires des ions, qui sont sensiblement des lignes de force, changent de forme lorsque, au champ électrique dû aux électrodes A et B, on ajoute le champ produit par C et D, et la forme nouvelle des lignes de force explique le phénomène si l'on tient compte de ladite dissymétrie.

A l'époque déjà ancienne où je publiais cette expérience j'admettais, que l'effet des chocs entre les particules en mouvement était surtout un développement de chaleur, qui préparait à l'étincelle un chemin plus facile. Ce développement de chaleur existe certainement, et bien qu'il ne joue pas un rôle principal, il ne doit pas être négligé.

§ 6. — *Phénomènes photo-électriques* (¹).

Il semble bien, d'après certaines expériences de Lénard (²), qui montrent l'émission de rayons cathodiques par les métaux électrisés négativement, placés dans le vide et frappés par des rayons ultraviolets, que cette explication doive être également adoptée pour mes nombreuses expériences antérieures sur les phénomènes photo-électriques, bien que, dans la plupart de ces expériences, les corps fussent placés dans l'air à la pression ordinaire. On devra seulement admettre que les électrons, émis par le corps exposé aux radiations, se transforment bientôt en ions négatifs par leur union à des atomes neutres. Il suffira donc de substituer les mots : *ions négatifs* à ceux que j'ai employés dans les publications citées plus haut : *particules* ou *molécules électrisées*, pour qu'elles exposent correctement les faits, d'accord avec la nouvelle théorie.

Sans insister sur ce point, je tiens à constater que les premières mesures de vitesse des ions, ou généralement des particules qui transportent les charges électriques, ont été celles que j'ai faites à l'occasion de ces recherches (³). Les vitesses (de 55 à 146 mètres) que j'ai alors mesurées sont plus grandes que celles qu'on a mesurées plus tard, mais cela tient à l'intensité plus grande du champ électrique dans mes expériences. La méthode employée était celle adoptée plus tard par Zeleny (⁴), ou à peu près. On employait un courant d'air de direction perpendiculaire à celle du mouvement des ions, et on mesurait le déplacement du point d'arrivée des ions ainsi produit.

(¹) Mem. della R. Acc. di Bologna, 11 nov. 1888. — Atti del R. Ist. Veneto, tome VIII (1889).
(²) Drude's Ann., tome II, page 359 (1900).
(³) *L. c.*
(⁴) Phil. Trans., tome 195, page 193 (1900).

Il y a quelque intérêt à rappeler les expériences relatives à l'action des radiations sur un corps pris à l'état naturel. Dans le cours de mes recherches, j'eus occasion de démontrer qu'un corps non électrisé (diélectrique ou conducteur) s'électrise positivement sous l'action des radiations. M. Hallwachs confirma ce fait, que d'abord j'attribuais à l'effet Volta entre le corps exposé aux radiations et les corps environnants.

De nombreuses expériences me permirent de démontrer, pour le cas d'un corps placé dans l'air à la pression normale, la loi suivante : *la charge positive du corps arrive à son maximum, lorsque la densité électrique atteint une valeur déterminée, qui dépend uniquement de la nature du corps*. Par exemple, s'il s'agit d'une sphère conductrice, le potentiel positif qu'elle prend est proportionnel à son rayon. Ceci peut s'expliquer, dans la théorie des électrons, de la manière suivante :

Sous l'action des radiations, des électrons sortent du corps avec une vitesse vraisemblablement très grande, et le corps devient positif. S'il se trouvait dans le vide, les électrons considérés formeraient de véritables rayons cathodiques, qui transporteraient rapidement à grande distance la charge négative. Mais dans l'air et à la pression atmosphérique les électrons deviennent bientôt des ions négatifs, qui se trouvent exposés à des chocs très fréquents avec les molécules neutres ; leur vitesse en reste très réduite, et enfin beaucoup d'entre eux, étant attirés par le corps, qui s'est chargé positivement, lui rapportent leur charge négative.

L'état final ou stationnaire aura lieu lorsqu'il y aura compensation entre les électrons émis et les ions négatifs qui retombent sur le corps. Cette série de phénomènes, qui s'accomplissent à l'intérieur d'une couche gazeuse très mince, dépend uniquement de l'intensité de la force électrique dans cette couche, dont la valeur finale sera probablement différente suivant la nature du corps en expérience, car la quantité et la vitesse des électrons émis varieront, vraisemblablement, pour les différents corps.

Comme à une valeur déterminée du champ près de la surface du corps correspond une valeur déterminée de la densité superficielle, la loi expérimentale reste ainsi expliquée.

Entre diverses méthodes, on peut choisir la suivante pour démontrer cette loi expérimentalement : Le conducteur sur lequel on fait arriver les radiations est un disque plan parallèle à une toile métallique communiquant avec la terre. Lorsqu'on éloigne l'un de l'autre les deux conducteurs, le potentiel positif maximum du disque croît (entre certaines limites) proportionnellement à la distance entre disque et toile. Il ne faut pas confondre ce phénomène avec ceux qui seront discutés dans le paragraphe 8.

Naturellement la loi tombe en défaut si la toile métallique est placée trop près du corps, de manière qu'elle se trouve au dedans de cette couche mince dont on a parlé. La même chose a lieu avec des distances qui ne sont pas très petites, si l'on diminue la pression de l'air. Évidemment l'épaisseur de la dite couche croît avec la raréfaction, car les chocs deviennent moins fréquents ; et les ions retombent en moins grand nombre sur le conducteur, tandis qu'un plus grand nombre d'entre eux rencontre la toile métallique. Voilà pourquoi le potentiel positif maximum du corps croît avec la raréfaction de l'air.

J'ai fait connaître, en 1890, le fait suivant qui peut aisément s'expliquer ici [1] : Un champ magnétique rend plus faible, ou même fait disparaître l'augmentation de charge positive qu'on obtient par raréfaction de l'air. Précisément comme dans une expérience classique faite plus tard par Thomson, les ions négatifs ou les électrons, sous l'action du champ magnétique, parcourent certaines courbes, qui les reconduisent sur le corps dont ils étaient

(1) *Sur la convection photo-électrique*, etc. Mem. della R. Acc. di Bologna, 27 aprile 1890.

partis. Ainsi le champ magnétique rend plus petite la charge positive du corps frappé par les radiations.

§ 7. — *Distribution du potentiel dans les tubes à décharge.*

La connaissance des valeurs du potentiel ou de la force électrique dans les différents points de l'espace parcouru par la décharge est d'une très grande utilité pour l'explication de ce phénomène. Si, en effet, on exprime par V le potentiel et par X la force électrique dans un point déterminé par la coordonnée x dirigée suivant la décharge, la somme des dérivées secondes du potentiel se réduit à $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}$ ou à $-\frac{\partial X}{\partial x}$, et l'équation de Poisson donne : $4\pi\rho = \frac{\partial X}{\partial x} = -\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}$, ρ étant la densité électrique de volume au point considéré. Si donc on a déterminé V^1 ou encore X pour différentes valeurs de x, on pourra calculer ρ, ou du moins voir quel est le signe de cette quantité, et découvrir ainsi s'il y a des charges dans le gaz, c'est-à-dire s'il y a plus d'ions positifs que d'ions négatifs ou inversement.

Les premières expériences de cette espèce ont été, je crois, celles de Warren de la Rue et Müller (1) ; celles de Schuster (2), Crookes (3), et les miennes (4) sont postérieures. Dans ces dernières années plusieurs physiciens ont fait des mesures nombreuses à ce sujet.

Les résultats des premiers expérimentateurs n'étaient pas concordants, tandis que mes expériences démontrèrent d'une manière très précise une accumulation d'ions près des électrodes, et particulièrement d'ions positifs près de la cathode. Il est bon d'observer, que dans mes expériences toute influence des charges, qui résident d'ordinaire sur les parois du tube à décharge, était nécessairement éliminée. En effet, dans mon appareil, les électrodes étaient sphériques et concentriques ; l'une d'elles A, généralement l'anode (fig. 4), était formée par la paroi argentée d'un ballon de verre, et l'autre C était une boule métallique placée au centre du ballon. Une sonde S (fil de platine protégé sur toute sa longueur, sauf à son extrémité, par un tube de verre), qu'on pouvait déplacer, permettait de déterminer le potentiel en différents points du gaz.

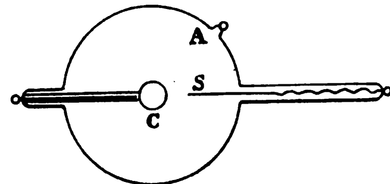


Fig. 4.

Si l'on emploie un galvanomètre, les extrémités du fil peuvent être mises en communication soit avec S et C, soit avec S et A. Même dans le deuxième cas on pourra déterminer la différence de potentiel entre S et C, car il suffira d'ajouter à celle entre S et A, celle qui existe entre A et C et que l'on peut mesurer séparément.

Avec cette deuxième disposition expérimentale on trouve que le potentiel diminue lorsqu'on va d'un point extrêmement voisin de la cathode à des points moins rapprochés ; on arrive bientôt à un minimum ; le potentiel croît ensuite, en continuant à s'éloigner de la cathode. On en a déduit l'existence d'une charge positive dans le gaz autour de la cathode, c'est-à-dire une accumulation d'ions positifs.

Si l'on adopte la première disposition, le résultat est différent ; mais cela s'explique aisément si l'on réfléchit, que lorsque S et C sont reliés par le galvanomètre, la sonde S joue

(1) Phil. Trans., tome 174, page 477 (1883).
(2) Proc. of the Roy. Soc., tome XLVIII, page 541.
(3) Inaugural Adress 15th january 1891, Inst. Roy. Engineers.
(4) *Sulla distribuzione del potenziale presso il catodo.* Mem. della R. Acc. di Bologna, 13 nov. 1892.

elle aussi le rôle de cathode, et doit s'entourer d'ions positifs. C'est la présence de ces ions qui empêche de reconnaître l'existence de ceux qui entourent la cathode.

Il suffit d'ailleurs de substituer au galvanomètre un électromètre, qui soit isolé d'une manière absolument parfaite, pour obtenir avec la première disposition les mêmes résultats qu'avec la deuxième.

On peut démontrer l'existence d'une faible atmosphère d'ions négatifs près de l'anode, si la boule C communique avec le pôle positif et A avec le pôle négatif de la pile. Celle-ci était formée par quelques centaines de couples de Volta.

Les recherches récentes ont confirmé ces conclusions. Presque toujours on a employé une double sonde, qui permet de déterminer la force électrique au lieu du potentiel.

Il serait utile de les répéter avec des électrodes concentriques.

§ 8. — *Propagation de l'électricité dans un gaz entre des lames parallèles dont on varie la distance.*

Je fus conduit aux expériences du paragraphe précédent en cherchant l'explication de quelques faits, qui à première vue paraissent paradoxaux, et que j'avais eu l'occasion d'établir au cours de mes recherches sur les phénomènes électriques produits par les radiations (ultraviolettes, de Röntgen, etc.).

Voici les principaux d'entre eux (1):

Un récipient, dans lequel on peut faire le vide, et qui contient un disque de zinc Z (fig. 5) chargé par le pôle négatif d'une pile, est fermé par un disque de quartz Q, qui permet de faire tomber sur Z un faisceau intense de radiations ultraviolettes. Entre Q et Z se trouve une toile métallique mobile R en communication avec le sol, près de la surface de laquelle on a tendu un fil isolé F communiquant avec un électromètre. La quantité d'électricité prise par ce fil dans un temps constant donnera une mesure du courant photo-électrique. Cela étant, si l'on fait varier la distance entre R et Z on trouve que, entre certaines limites, l'intensité du courant considéré croît en même temps que la distance réciproque des deux électrodes.

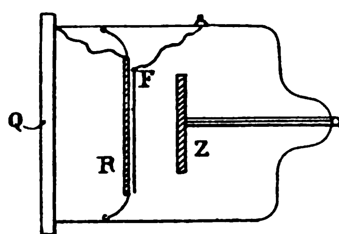


Fig. 5.

Si l'on tient compte de cette circonstance, que vraisemblablement l'anode est réellement constituée, non seulement par la toile R, mais aussi par les parois du récipient, on pourra assimiler le fil F à la sonde S du paragraphe 7; le phénomène que l'on vient de décrire s'explique ainsi par la présence d'ions positifs près du disque Z.

Si la force électromotrice de la pile de charge est assez élevée, on observe un phénomène analogue sans l'action des radiations. On pourra encore simplifier le dispositif de l'expérience en supprimant le fil F et en faisant communiquer R avec l'électromètre. Enfin l'appareil pourra devenir celui de la figure 6 (2). Un tube contenant de l'air raréfié porte deux électrodes A, B, ayant, par exemple, la forme de petits disques parallèles : l'un de ces disques est mobile. Ayant mis ce tube en circuit avec un galvanomètre et une pile de Volta de force électromotrice suffisante (quelques centaines de couples), j'observai le phénomène

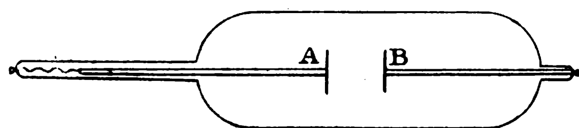


Fig. 6.

(1) *Sur la convection photo-électrique*, etc. Mem. della R. Acc. di Bologna, 27 aprile 1890.

(2) *L. c.*, page 112.

suivant: Si A et B sont très rapprochés il n'y a pas de courant; celui-ci se produit lorsqu'on éloigne suffisamment A de B. En continuant à augmenter la distance entre les électrodes, le courant augmente d'intensité, arrive à un maximum, puis son intensité décroît et arrive même à devenir nulle. Si la pression du gaz n'est pas trop petite et si le nombre de couples formant la pile est à peine suffisant, le phénomène devient surprenant par la manière brusque avec laquelle il se produit. En effet un déplacement de moins d'un millimètre donné à l'électrode mobile peut suffire pour que le courant se produise, arrive au maximum et diminue enfin d'intensité jusqu'à zéro. L'expérience est particulièrement remarquable si l'on substitue au galvanomètre un électromètre ou un simple électroscope à feuilles d'or.

Ce phénomène est, en substance, identique à celui qui a été observé récemment par Peace et par Carr(1); ils ont en effet constaté, que le potentiel explosif est minimum pour une certaine distance entre les électrodes, et augmente si l'on diminue encore cette distance.

Si l'on tient compte de la manière avec laquelle on peut passer des expériences du paragraphe précédent à celles dont il s'agit ici, on est tenté d'expliquer celles-ci par la présence d'une atmosphère d'ions positifs autour de la cathode. Il est en effet très vraisemblable que, même lorsque le courant ne s'établit pas d'une manière durable, la décharge commence, mais est arrêtée par l'accumulation des ions près des électrodes (surtout des ions positifs près de la cathode). Les anciennes expériences de Hittorf et de Gassiot, qui montrent que dans un gaz extrêmement raréfié la décharge suit de préférence un long chemin, plutôt que de se former entre deux électrodes très rapprochées, auraient la même origine.

Mais voici d'autres faits, qui semblent analogues aux précédents, et pour lesquels on a cependant donné d'autres explications.

Deux disques métalliques parallèles, placés dans l'air à la pression ordinaire, sont en communication, l'un avec le pôle isolé d'une pile, l'autre avec un électromètre, ce dernier, pouvant être, au besoin, relié au sol. L'air étant ionisé par les rayons X, j'ai observé le phénomène suivant(2), qui a été plus tard confirmé par J.-J. Thomson et Rutherford(3): le courant entre les deux disques (que l'électromètre mesure de la manière connue) augmente d'intensité entre certaines limites lorsqu'on augmente la distance qui sépare les deux électrodes. On explique d'ordinaire ce fait par cette circonstance, que le courant est saturé ou presque, c'est-à-dire qu'il utilise tous ou presque tous les ions créés par les rayons de Röntgen; dès lors en éloignant les disques on introduit entre eux un plus grand nombre d'ions, d'où l'intensité plus forte du courant(4).

Un phénomène semblable a été constaté récemment, en employant les rayons du radium à la place des rayons X(5).

Un des faits rappelés plus haut est particulièrement semblable au précédent; il en diffère seulement en ce que l'on emploie les rayons ultraviolets au lieu des rayons X, — ce qui rend nécessaire de substituer au disque positif une toile métallique, — et en ce que l'air est raréfié. On explique ce phénomène par l'ionisation que produisent les chocs des ions négatifs repoussés par la cathode, lorsque le champ électrique est très intense(6). Mais on

(1) J.-J. Thomson. *Conduction of Electricity through Gases*, page 356.

(2) *Nouvelles études sur la dispersion produite par les rayons de Röntgen*. Rond. della R. Acc. dei Lincèi, 3 maggio 1896. — *Sur la propagation de l'électricité dans les gaz traversés par les rayons de Röntgen*. Mem. della R. Acc. di Bologna, 31 maggio 1896.

(3) Phil. Mag., tome 43 (1896).

(4) J.-J. Thomson, *l. c.*, page 13.

(5) *De quelques phénomènes observés dans l'air ionisé par des corps radioactifs*. Rend. della R. Acc. dei Lincèi, tome XII, page 237 (1904).

(6) J.-J. Thomson, *l. c.*, page 232.

peut objecter que ce phénomène a été observé, d'après mes observations personnelles, même avec de faibles champs (4 ou 5 volts de différence de potentiel).

On donne donc trois explications différentes pour des phénomènes différents mais très semblables entre eux ; peut-être que, après les avoir rapprochés, comme je viens de le faire, on arrivera à une explication plus uniforme et plus complète. Cette explication devra être en effet assez complète pour donner la raison du fait suivant : Si l'on fait agir un champ magnétique d'intensité suffisante, les phénomènes décrits dans ce paragraphe, ou tout au moins ceux qui se produisent dans un gaz raréfié, tendent à disparaître ; par exemple, dans le cas de l'expérience de la figure 6, lorsque le champ magnétique (perpendiculaire à la ligne qui joint les électrodes) est en action, l'intensité du courant décroît régulièrement lorsqu'on augmente la distance qui sépare les électrodes (1).

D'après moi, on arrive à cette explication complète des phénomènes, si l'on tient compte à la fois des explications données par Thomson, c'est-à-dire de l'effet dû à la moindre ionisation par choc qui se produit lorsque, pour un motif quelconque, il y a peu de molécules entre les électrodes, et de l'explication que j'ai donnée moi-même, basée sur cette espèce d'engorgement des ions positifs accumulés près de la cathode. Si l'on ne tient pas compte de ce dernier effet, il me semble impossible d'expliquer l'action exercée par le champ magnétique (2).

§ 9. — *Décharges électriques ayant l'apparence de luminosités qui se meuvent lentement.*

Je désire, en dernier lieu, appeler l'attention sur des recherches concernant une forme très singulière de décharges lumineuses que j'ai obtenue par l'emploi de condensateurs de très grande capacité et de circuits contenant de très grandes résistances représentées par des colonnes d'eau (3). Ces décharges se manifestent par une luminosité de forme sphérique ou allongée, quelquefois d'autre forme, qui naît sur l'électrode positive, s'éloigne de celle-ci en marchant vers la cathode, pour s'évanouir tout à coup avant d'y arriver, après avoir été visible pendant une seconde environ ou quelques secondes, la durée du phénomène pouvant être telle.

Quelquefois la luminosité mobile rebrousse chemin avant de s'évanouir, ou encore elle

(1) *Sur la convection photo-électrique*, ecc., *l. c.*, page 113. — Une expérience que je viens de faire donne une confirmation de la relation entrevue entre les faits relatés dans ce paragraphe et l'expérience connue de Hittorf ; cette expérience se réalise avec un petit tube contenant deux électrodes filiformes qui arrivent presqu'à se toucher, et dans lequel on a fait un vide excellent. Les décharges d'un condensateur éclatent dans l'air extérieur entre deux boules communiquant avec les électrodes du tube, et éloignées de quelques centimètres l'une de l'autre, mais ne se forment pas dans le tube entre les deux fils très rapprochés. J'ai placé ce tube entre les pôles de l'électro-aimant de Ruhmkorff et j'ai réglé la distance explosive entre les boules ; le phénomène que j'avais prévu s'est alors produit, car ayant lancé un courant dans l'électro-aimant, les étincelles dans l'air ont disparu, et les décharges se sont produites dans le tube, dont les parois ont, en effet, montré une vive fluorescence verte. L'explication la plus naturelle de ce phénomène paraît être la suivante : Même lorsque la décharge a lieu entre les boules, il y a un commencement de décharge dans le tube, c'est-à-dire l'émission d'électrons de la cathode, leur choc contre les molécules gazeuses, l'ionisation et la formation d'ions positifs, qui s'accumulent près de la cathode, etc. (voir paragraphe 7). Le champ magnétique donnera une forte courbure aux trajectoires des électrons, les chocs seront moins nombreux, et l'accumulation d'ions positifs, à cause de laquelle la décharge ne pouvait continuer, se trouve empêchée ou affaiblie.

(2) Voir la note précédente, et aussi dans les C. Rend. de l'Académie des Lincèi (1906) une Note : *Sur quelques phénomènes apparemment paradoxaux, de passage de l'électricité dans les gaz.*

(3) *Sur une espèce d'étincelles*, etc. Mem. della R. Acc. di Bologna, 25 geunaio 1891. — *Sur les étincelles constituées par des masses lumineuses en mouvement.* Rend. della R. Acc. dei Lincèi, 19 aprile 1891. — *Recherches expérimentales sur certaines étincelles*, etc. Mem. della R. Acc. di Bologna, 26 aprile 1891. — *Nuove esperienze*, etc. Mem. della R. Acc. di Bologna, 19 maggio 1895. — Voir aussi la *Lumière Electrique*, 12 déc. 1891.

reste pendant quelque temps immobile. Dans certaines conditions[1] la luminosité peut rester immobile et visible en permanence, si la source qui fournit la charge au condensateur est maintenue en action ; ainsi, dans ce cas, la capacité très grande est nécessaire pour que le phénomène commence, mais il peut continuer indéfiniment sous l'action continue du courant fourni par la source.

Dans certaines conditions particulières chaque décharge est *composée* et non *simple,* c'est-à-dire qu'elle est constituée par une émission, de la part de l'anode, de plusieurs luminosités mobiles successives ; généralement leur vitesse est plus grande que pour la décharge simple.

Ce phénomène curieux, qui, par ses allures, rappelle les fameuses décharges globulaires, ne se produit nettement que lorsque le gaz a une certaine pression variable suivant les cas, mais qui d'ordinaire est de un ou plusieurs centimètres de mercure. Pour de semblables pressions la lumière négative et l'espace obscur de Crookes sont certainement tout à fait rapprochés de la surface de la cathode, et c'est ce que l'on voit assez clairement. Il en résulte, que la luminosité mobile constitue à elle seule ou représente la colonne positive. Si l'on adopte donc l'explication que l'on donne aujourd'hui de la lumière positive, on pourra dire que la luminosité mobile est le lieu où les électrons, qui partent de la lumière négative, arrivent avec une vitesse suffisante pour produire une nouvelle ionisation des molécules gazeuses.

En raison de la grande résistance du circuit, la différence de potentiel entre les électrodes continue à augmenter, même après le commencement de la décharge ; en conséquence de cette augmentation, le chemin qu'ont à parcourir les électrons pour acquérir l'énergie nécessaire à l'ionisation devient plus court, et le mouvement de la luminosité, de l'anode vers la cathode, reste ainsi expliqué.

La formation de plusieurs luminosités successives constitue un phénomène analogue à celui des décharges intermittentes. Si la différence de potentiel est assez élevée, il peut se faire que la vitesse des électrons, après qu'ils ont produit une première luminosité mobile, devienne assez grande en arrivant à l'anode pour en produire une autre ou d'autres successives.

On explique donc le phénomène dans ses lignes générales ; mais de nombreux détails restent sans explication. Si, par exemple, le tube a un étranglement, on voit des luminosités mobiles partir de la partie étroite et se diriger vers la cathode, car, comme dans d'autres cas semblables, l'étranglement se comporte comme anode pour la portion du tube qui est du côté de la cathode, et réciproquement. D'autres détails restent encore à expliquer, par exemple la nécessité ou l'opportunité d'employer de grandes capacités et de grandes résistances, la nécessité que la pression soit comprise entre certaines limites assez voisines, qui dépendent de la capacité, de la résistance, etc.

Enfin il reste à savoir pourquoi le phénomène dont il s'agit se présente d'une manière parfaite dans l'azote, un peu moins nettement dans l'oxyde de carbone et ne se présente pas visiblement dans beaucoup d'autres gaz que j'ai essayés. De nouvelles recherches seraient donc très opportunes pour éclairer ce groupe de phénomènes, et à l'usage de ceux qui voudraient s'y engager, je rappellerai que pour obtenir les luminosités mobiles d'une manière satisfaisante il faut employer un condensateur formé d'un grand nombre de grandes bou-

---

(1) Il faut, en particulier, provoquer la décharge en mettant brusquement en contact réciproque les boules du spinthéromètre, qui doit toujours être placé dans le circuit, de manière qu'il ne reste dans celui-ci, pour la production d'une décharge lumineuse, d'autre place que le tube dans lequel se produit le phénomène étudié.

***

teilles de Leyde (plus de cent dans mon cas) formant ensemble une capacité d'environ un microfarad, et pouvant comporter une différence de potentiel correspondant à une longueur d'étincelle de deux centimètres et même davantage, dans l'air à la pression ordinaire.

Pour charger le condensateur, une bobine d'induction, même des plus grandes dimensions, serait insuffisante : une batterie d'accumulateurs ne convient non plus, car il faudrait un nombre d'éléments extrêmement considérable. Il faut donc employer une machine à influence très puissante ; mais même avec une machine à plusieurs disques, il faudra souvent employer une dizaine de minutes et même quelquefois davantage pour donner au condensateur la charge nécessaire.

Aug. Righi.

NOTE SUR LES LAMPES A ARC DIFFÉRENTIELLES A COURANT CONTINU ET LEURS PRINCIPAUX MONTAGES

Principe. — Sans vouloir entrer dans leur description complète, nous rappellerons cependant que les lampes de ce type se composent essentiellement de deux enroulements : l'un en série avec l'arc, l'autre en dérivation, dans lesquels plongent deux noyaux de fer doux — quelquefois un seul si les deux bobines sont portées sur le même axe. Ces noyaux reliés par des leviers et des contrepoids appropriés forment un système en équilibre quand les ampère-tours série et les ampère-tours dérivation sont égaux. Ce système agit sur les charbons soit directement soit par l'intermédiaire d'un frein, d'un déclic ou d'un servo-moteur, mais toujours de telle façon que l'enroulement fil fin tende à rapprocher les charbons, l'enroulement gros fil à les écarter, c'est-à-dire à produire une variation de la longueur de l'arc s'opposant à une augmentation de puissance d'un enroulement par rapport à l'autre. Par suite, dans une lampe en marche normale, il existe entre l'intensité du courant et le voltage aux bornes un rapport fixe correspondant à l'égalité des ampère-tours série et des ampère-tours dérivation.

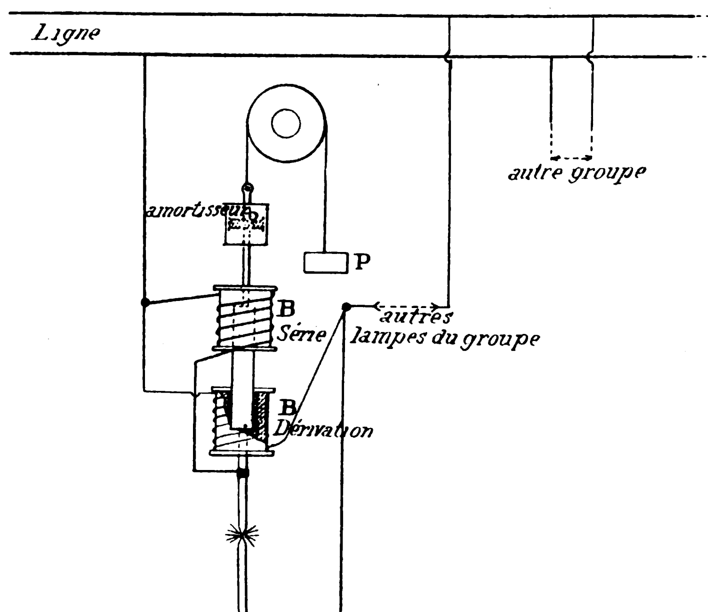


Fig. 1.

En outre, pour la facilité de la mise en service, il est nécessaire de prévoir un dispositif de recul et un d'amortissement. A l'allumage, les ampère-tours dérivation amènent les charbons au contact ; la résistance de l'arc étant alors nulle, les ampère-tours série sont prépondérants. Sur d'anciens systèmes ces ampère-tours n'avaient pour ainsi dire qu'une action

négative ; ils combattaient simplement l'action de l'enroulement dérivation sans pouvoir produire par leur action prépondérante l'écartement des crayons. Dans ces conditions les charbons à l'allumage restaient au collage et l'arc ne jaillissait franchement que lorsque, au bout d'un temps quelquefois très long, le courant exagéré admis avait usé les pointes. Toute perturbation de l'arc pouvait ramener cette période désagréable.

Actuellement sur les lampes dites à recul, si l'intensité dépasse sa valeur fixée par le voltage, les ampère-tours série agissent sur le système pour relever le charbon supérieur. Par suite le voltage aux bornes arrive au voisinage de sa valeur normale, le surampérage est diminué et l'arc jaillit franc de suite.

Mais l'attraction des ampère-tours série est si brusque que sans freinage, les charbons dépasseraient la limite de maintien de l'arc ; il serait soufflé, et les pointes revenant au contact, le même fait se reproduirait jusqu'au moment où les charbons suffisamment échauffés donneraient une atmosphère conductrice permettant à l'arc de s'amorcer.

Pour éviter ces oscillations on adjoint au système de leviers un amortisseur généralement constitué par une pompe qui aspire et refoule l'air par de petits clapets ou par l'entrefer du piston. Le freinage est d'autant plus énergique que la vitesse du système est plus grande. Il n'intervient donc pas au moment du réglage qui ne nécessite que de petits mouvements, mais au moment de l'allumage, il agit énergiquement pour permettre aux charbons d'arriver doucement et sans oscillations au point d'équilibre.

Réglage. — Pour construire les enroulements d'une lampe il faut connaître le voltage et l'intensité de régime. L'expérience indique en outre un nombre minimum d'ampère-tours à porter sur les bobines, au-dessous duquel l'action différentielle sur les noyaux serait trop faible et la lampe peu sensible. Connaissant ces données il devient facile de calculer la bobine série, la section du fil ne dépendant que de la densité de courant admise. Théoriquement on déterminerait aussi bien la bobine fil fin. Il suffirait, étant connu le voltage aux bornes, le nombre d'ampère-tours et la longueur de la spire moyenne déduite de la carcasse de la bobine, de se donner la perte par effet Joule consentie. On en déduirait le diamètre du fil et le nombre de tours.

Les lampes différentielles pourraient donc être montées avec des bobines interchangeables. Ayant admis un nombre d'ampère-tours, il suffirait de construire des enroulements gros fil correspondant aux différentes intensités et des bobines fil fin aux différents voltages usités.

De telles lampes sortiraient de l'atelier de montage parfaitement réglées. En réalité la précision des mesures électriques, la régularité du fil qu'on obtient très couramment dans le commerce, permettent de faire industriellement en fil très fin jusqu'à 25/100 de millimètre des bobines dont la résistance ne varie pas de l'une à l'autre de plus de 5 °/₀, les mesures étant faites à la même température. Si l'un des enroulements fil fin s'écarte notablement de la résistance moyenne, il en résulte une variation d'ampère-tours que l'on peut corriger soit par une variation égale des ampère-tours gros fil, soit par des modifications apportées aux contrepoids, aux bras de leviers ou à l'enfoncement des noyaux dans les bobines. Le premier système permet une correction absolue. Le nombre de tours d'une bobine dérivation étant fixe, si l'on connaît sa résistance, on en déduit ses ampère-tours au voltage normal ; en divisant ce nombre par l'intensité de régime, on a alors le nombre de spires à porter sur la bobine série. Mais dans ce cas on ne peut plus parler d'enroulements série interchangeables.

Les autres méthodes n'ont pas cet inconvénient, mais elles ne peuvent se résumer par des tables ou des courbes qu'après de nombreuses expériences.

Des bobines ainsi réglées au montage permettent, quand on met la lampe sur le courant, d'obtenir immédiatement une marche parfaite. Toute irrégularité provient alors d'un vice mécanique : mauvais équilibrage des pièces, coefficient de frottement du frein variable, etc. Il faut alors revoir minutieusement la lampe plutôt que d'avoir recours à certains trucs : addition de contrepoids, déplacement de la position où se produit le réglage. D'ailleurs ces défauts apparaissent d'autant moins que l'action différentielle des bobines sur les noyaux est plus puissante, c'est-à-dire que le nombre d'ampère-tours choisi est plus grand. Toute réaction mécanique disparaît alors devant l'action magnétique qui peut être considérable.

Il ne faudrait pas toutefois dépasser un certain nombre d'ampère-tours par bobine. Avec un noyau non saturé, l'attraction est proportionnelle au carré de l'intensité; avec un noyau saturé elle n'est proportionnelle qu'à la première puissance. Évidemment pour la sensibilité du système il sera bon de rester dans le premier cas, mais ce n'est en réalité que par de nombreux essais que l'on détermine pour une lampe les dimensions des noyaux et des bobines.

Nous signalerons particulièrement certains types où les bobines au lieu d'agir sur deux noyaux suspendus à un fléau de balance sont bout à bout et n'agissent que sur un seul noyau pénétrant également dans chacune d'elles. Ici, c'est la différence des ampère-tours qui entre en jeu. Par suite au moment du réglage, la saturation du fer n'est jamais atteinte, quelle que soit l'importance des enroulements.

Il y a également lieu d'insister spécialement sur la nécessité d'utiliser des fers présentant le moins possible d'hystérésis. En effet, par suite du magnétisme remanent, un fer demande pour se déplacer dans une bobine ou dans l'autre des variations d'intensité (bobine série) ou de voltage (bobine dérivation) d'autant plus grandes que son hystérésis est plus considérable. Avec des fers de mauvaise qualité à ce point de vue, les courbes d'intensité seront très sinueuses, c'est dire que pratiquement la stabilité de l'arc sera beaucoup diminuée pour cette raison. On peut comparer cette action de l'hystérésis à celle d'un frein permanent appliqué contre les noyaux.

Ce choix judicieux des fers est surtout absolu dans le cas des lampes à un seul noyau sollicité par deux bobines portées par le même axe. Là, en effet, l'aimantation du fer est tantôt dirigée dans un sens, tantôt dans l'autre; aussi les effets d'hystérésis sont-ils plus importants que dans le cas de deux noyaux distincts plongeant dans des bobines placées par exemple côte à côte où les actions magnétiques, tout en étant variables, sont dirigées dans le même sens.

Les fers seront donc des fers de Suède au bois recuits à plusieurs reprises. Personnellement des expériences comparatives faites avec des fers d'abord non recuits, puis ensuite recuits, nous ont convaincus de la nécessité de cette opération.

Marche en série.

La marche en dérivation des lampes à courant continu ne présente aucun intérêt. Le voltage utilisable aux bornes d'un arc étant compris entre 25 et 60 volts et les canalisations existantes étant le plus généralement au minimum de 100 volts, il faudrait dépenser dans un rhéostat une énergie considérable par rapport à la puissance utile.

L'inconvénient des arcs en série (que toute irrégularité de l'un d'eux se fait sentir sur tous les autres) disparaît si les lampes sont munies de dispositifs de réglage assez doux et assez progressifs et si la combustion des charbons a lieu sans explosions. Ces conditions peuvent être suffisamment réalisées dans la pratique actuelle. En réalité, les grandes séries

d'arcs forment vis-à-vis de chacun de leurs éléments l'effet d'un volant et l'intensité du système varie peu quelles que soient les variations d'une lampe.

L'intensité qui traverse les enroulements série étant la même, il faut que les enroulements shunts se partagent également le voltage, faute de quoi les lampes brilleront inégalement, ce qui est particulièrement désagréable lorsqu'elles serviront à éclairer le même local. Pour éviter cet inconvénient, elles devront être réglées par les moyens indiqués plus haut, d'une façon absolument parfaite. Le courant qui traverse le système est alors celui qui serait obtenu dans l'une quelconque des lampes sous son voltage normal. Il semblerait inutile d'employer les rhéostats nécessités sur les lampes en dérivation, une lampe différentielle réglant son intensité, sous une différence de potentiel donnée, par l'écart des charbons. En réalité, il faut considérer deux cas :

Dans le cas de charbons homogènes, on ne saurait, sans erreur, considérer l'arc comme ayant une résistance analogue à une résistance ohmique augmentant avec l'écart des charbons. Tout ce que l'on peut faire, pour se rendre compte du phénomène, consiste à relever dans de nombreuses expériences, pour des diamètres donnés de charbon, les valeurs simultanées du voltage, de l'intensité et de la longueur d'arc, puis à essayer de relier ces quantités par une relation empirique. Dans le cas de charbons à grosse mèche nous verrons que l'on peut parler de résistance de l'arc ou tout au moins définir une grandeur (numériquement égale au rapport du voltage à l'intensité) qui tend à se comporter comme une résistance ohmique. Enfin si l'on a affaire à un charbon à petite mèche, l'importance de cette mèche indiquera dans chacun de ces cas intermédiaires, celle des limites précédentes dont on se rapproche le plus.

1° *Cas des charbons homogènes.* — Suivant Mme Ayrton, la relation qui unit V, I et l (différence de potentiel en volts, courant en ampères et écartement des pointes en centimètres) est entre certaines limites la suivante :

$$V = 38,88 + 2,074\, l + \frac{11,66 + 10,54\, l}{I},$$

qui montre que sous voltage constant l et I augmentent en même temps. Or, quand dans une lampe différentielle, l'intensité augmente, l'enroulement série allonge l'arc, ce qui, d'après l'expression précédente, favorise un plus grand passage de courant et remplit ainsi un rôle contraire à son but.

Avec des lampes employant des charbons à mèche très peu importante et se rapprochant ainsi des charbons homogènes (lampes de 45 v. à 50 v.), nous avons remarqué expérimentalement que l'intensité baisse peu quand l'écart aux pointes augmente même dans des proportions notables. Par suite si l'on prend un groupe de n lampes identiques, elles se partagent également le voltage, mais l'intensité commune prend une valeur qui ne dépend que de la résistance du circuit.

Soient : V le voltage du réseau ;

I l'intensité dans le circuit ;

n le nombre de lampes ;

u le voltage d'une lampe aux pointes des crayons ;

r la résistance auxiliaire + celle des enroulements + celle des charbons.

On pose immédiatement

$$V = rI + nu$$

équation qui donne r si l'on a choisi u et I dans un réseau de voltage V donné.

En marche une variation du du voltage des lampes produira une variation $d\text{I}$ de l'intensité liée à du par la relation différentielle :

$$r d\text{I} = -n du$$

d'où

$$d\text{I} = -\frac{n}{r} du. \qquad (1)$$

Il sera avantageux par conséquent, au point de vue de la stabilité du circuit, d'avoir r aussi grand que possible, mais la perte d'énergie augmente dans le même rapport.

On pourrait penser qu'il suffirait d'employer sous ces voltages et avec ces charbons des lampes à potentiel constant ne possédant qu'un enroulement en dérivation, leur intensité étant réglée par un rhéostat en série. L'expérience montre toutefois que, grâce à leur système de balance parfaitement équilibré, les lampes différentielles sont plus sensibles et nécessitent un rhéostat beaucoup plus faible, ce qui permet sur un réseau donné d'avoir des arcs de plus haut voltage et de moins dépenser d'énergie par effet Joule.

2° *Cas des charbons à grosse mèche.* — Avec des charbons à bas voltage (27 à 38 volts) l'arc est dû surtout à la présence de vapeurs conductrices produites par des mèches de gros diamètre. Il peut alors être considéré comme une véritable résistance et la tension aux bornes est de la forme :

$$\text{V} = a + b\text{I},$$

a et b étant des constantes.

Si le voltage aux bornes est trop considérable, l'enroulement dérivation rapproche les pointes des charbons, ce qui produit d'une façon efficace l'abaissement de la différence de potentiel.

C'est pour ces voltages surtout que l'on a un rapport fixe entre l'intensité et le voltage dans une lampe donnée.

Soit K ce rapport du voltage à l'intensité.

En négligeant la résistance très faible des charbons, enroulements et connexions on peut écrire

$$\text{V} = nu \quad \text{et} \quad u = \text{KI},$$

d'où :

$$\text{V} = n\text{KI};$$

n et I étant choisis pour un réseau de voltage V donné on déduit K de cette équation. Dans ces conditions il n'est plus besoin de rhéostats. De bonnes lampes avec de bons charbons donnent une marche parfaite sans aucune perte d'énergie dans les résistances. La relation différentielle correspondant à (1) devient ici :

$$d\text{I} = 0$$

et montre que, théoriquement, aucune variation de l'intensité n'est possible.

(A suivre.) A. FOULHOUZE et L. GUEDENEY.

REVUE INDUSTRIELLE ET SCIENTIFIQUE

THÉORIES ET GÉNÉRALITÉS

Contribution à la théorie de la décharge dans les gaz. — **H. Sieveking.** — *Drudes Annalen*, juin 1906.

La théorie de Faraday indique qu'il se produit une décharge électrique aussitôt qu'une tension déterminée est dépassée. Cette théorie ne se rapporte pas à la différence de potentiel entre électrodes, mais à la chute de potentiel de décharge ou au « gradient de décharge ». C'est quand celui-ci dépasse une valeur critique déterminée qu'il se produit une décharge disruptive.

La mesure du gradient de décharge présente de grandes difficultés. Il se produit des diffé-

rences suivant la polarité des électrodes. D'après Faraday, Wiedemann et Rühlmann, le gradient de décharge est plus faible au pôle négatif.

Dispositif expérimental. — L'auteur a entrepris une série d'expériences pour étudier les phénomènes en jeu dans la décharge électrique. Deux cloches de pompe à air à tubulures d'une contenance de 30 litres étaient assemblées par un anneau de zinc de $0^{cm},2$ d'épaisseur, 28 centimètres de diamètre intérieur et 32 centimètres de diamètre extérieur sur lequel elles étaient mastiquées (fig. 1). Dans l'une des tubulures était scellé un tube de quartz de 25 centimètres de longueur et 2 centimètres de diamètre intérieur. L'une des électrodes consistait en une sphère de laiton de 5 centimètres de diamètre ;l'autre électrode était une tige de laiton terminée par une pointe fine. Celle-ci était reliée d'une façon permanente à la terre pendant l'expérience. Tout l'œuf électrique était recouvert d'un filet en fils de laiton relié à la terre ; il était placé verticalement sur un support en bois et portait deux anneaux de fils R qui permettaient d'y créer dans l'œuf un champ magnétique dirigé suivant le grand axe de celui-ci. Le vidage était effectué au moyen d'une pompe à mercure automatique de Raps produisant en 36 heures un vide de un centième à un millième de millimètre de mercure. La mesure de la pression était faite au moyen d'une jauge de Mac Leod. La source d'électricité était une petite machine à influence à double rotation dont les plateaux avaient 25 centimètres de diamètre. Cette machine était entourée d'un filet métallique relié à la terre. L'auteur a employé aussi une batterie d'accumulateurs à haute tension comprenant 1 000 éléments reliés par groupes de 20. La dérivation d'un pôle à la terre était effectuée par l'intermédiaire d'une résistance à glycérine.

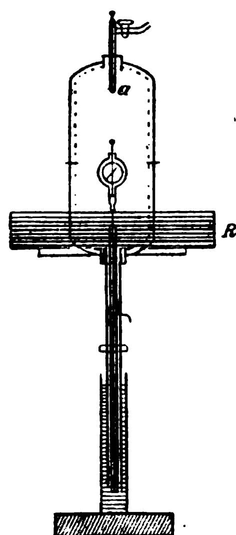


Fig. 1.

Conductibilité du vide. — Un électroscope d'Elster et Geitel était placé dans l'œuf (fig. 1) et pouvait être chargé par l'intermédiaire d'un fil passant dans un tube barométrique relié à la partie inférieure de l'œuf. Pour une pression de 8 millièmes de millimètre, la charge prise sous + 660 volts par cet électroscope restait invariable pendant une heure. Pour une pression de $0^{mm},003$, la charge que l'on pouvait atteindre était de 1 804 volts ; pour $0^{mm},002$, elle était de 2 400 volts à peu près. Une charge à 2 200 volts est restée invariable pendant 14 heures pour une pression de $0^{mm},002$. L'isolement pour cette tension est donc absolu. Avec le vide le plus poussé que l'on pouvait atteindre ($0^{mm},0015$), il était possible d'aller jusqu'à la limite de l'échelle de l'électromètre, qui était de 4000 volts.

Action d'un champ magnétique. — L'action d'un champ magnétique fait disparaître la charge qui se réduit à une faible portion résiduelle. Pour une intensité de champ magnétique de 40 C. G. S. (1,7 ampère dans le fil), la tension tombait brusquement de 600 volts. La décharge était totale pour un champ plus puissant. Pour un champ magnétique moins puissant ($i = 0,5$ ampère), la chute de tension se produisait lentement. Après établissement du courant, la tension tombait de 450 volts, puis de 300 volts pendant la première heure, et de 300 volts pendant la deuxième heure. Sans champ magnétique, la tension restait invariable pendant 12 heures. L'action du champ magnétique doit produire une modification de structure et une diminution corrélative du gradient de potentiel. Une telle modification de structure peut être attribuée à l'influence du champ magnétique sur les électrons en mouvement dans les molécules qui représentent des courants électriques. S'il y a un électron en mouvement, la présence d'un champ magnétique produit une rotation dont la vitesse dépend de la masse de l'électron.

Riecke a calculé la trajectoire d'un électron dans le cas où les surfaces de niveau sont des cylindres concentriques à la surface de la cathode et a trouvé une spirale qui s'approche asymptotiquement d'un cercle de diamètre d'autant plus faible que l'intensité du champ magnétique est plus grande : il tient compte aussi de la contraction de l'espace obscur dans un champ magnétique. Cette contraction de l'espace obscur est peut-être la cause de l'action de décharge du champ magnétique, car l'élargissement de l'espace obscur lors de la décharge croît quand le degré de vide augmente : la contraction pro-

duite par le champ magnétique serait alors due à un état de vide moins poussé, et il en serait ainsi au-dessous du point critique où, quand le vide augmente, le gradient (la dureté) croît. On pourrait comprendre aussi d'après cela pourquoi l'action de décharge du champ magnétique ne peut être observée que pour des vides très poussés.

Action des radiations. — Les essais qui précèdent avaient montré avec certitude que le vide ne présente aucune conductibilité (au-dessous de la tension de décharge). La conductibilité que présente toujours l'air ambiant provient, d'après Geitel, de la teneur en émanation de thorium, de sodium ou d'autres substances actives. Elle peut, en outre être attribuée à des traces de substances radio-actives dans les parois des récipients ou, finalement, à une sorte de radiation existant partout et facilement absorbable. L'air enfermé dans l'œuf électrique n'est soumis à aucune de ces influences : toute émanation existante est entraînée au moment du vidage et, le pouvoir d'ionisation d'un gaz diminuant quand le degré de vide augmente, l'activité possible des parois de verre ou une radiation extérieure ne se font pas sentir. Il ne semblait pas impossible que, malgré le vide poussé, l'action de la lumière ultraviolette, des rayons X, ou d'une préparation très active de radium pussent produire une ionisation. Les électrons artificiellement introduits devraient alors acquérir des vitesses élevées sous l'action du champ électrique. L'auteur a fait un essai en employant 10 grammes de bromure de radium et trouva que l'œuf vidé était tout à fait insensible à l'action des rayons émanant de ce corps.

Valeur des capacités. — L'auteur a fait aussi des expériences pour déterminer s'il existe une inégalité des capacités pour une charge négative et pour une charge positive. Pour cela il a employé la méthode de la charge divisée. L'électrode supérieure *a* de l'œuf était reliée avec un électroscope et, pour une tension déterminée, exactement connue, était amenée en contact avec l'électroscope non chargé placé dans l'œuf. On pouvait ainsi déterminer la capacité de celui-ci, d'après la tension résultante. La charge était faite au moyen de 400 éléments cuivre-zinc-sulfate de magnésium noyés dans de la paraffine et réunis ensemble par groupes de 40. Une sphère de zinc de 25 centimètres de diamètre suspendue à une baguette de soufre de 15 centimètres était reliée à l'électrode supérieure et à un électroscope sensible dont la capacité était connue. La somme des capacités de l'électroscope, de la sphère de zinc, de l'électrode et des connexions était égale à 38 centimètres. On chargeait le système à une tension déterminée, puis on l'abandonnait à lui-même : quand la tension était tombée à une certaine valeur, on amenait l'électromètre en contact avec l'électrode et on mesurait immédiatement la valeur de la tension. Si, d'après les résultats des mesures, on calcule les capacités dans le vide C' et dans l'air C'', on obtient $C' = 8$ centimètres et $C'' = 8^{cm},9$ d'où $x = 0,89$. Un grand nombre de mesures faites pour déterminer s'il existe une différence pour la charge positive et pour la charge négative ont montré que cette différence n'existe pas.

Décharge des pointes. — Des expériences ont été faites par l'auteur sur la décharge des pointes dans le vide. On sait que, pour qu'il se produise un courant permanent entre une pointe et une plaque opposée, il faut qu'il existe, à cette pointe, une tension minima dépendant de la forme de la pointe, de la nature et de la pression du gaz environnant, de la proximité d'autres conducteurs, etc. Si l'on relie un disque à un électromètre à quadrants ou si on le connecte à la terre par l'intermédiaire d'un galvanomètre sensible, on peut déterminer exactement pour quelle tension une pointe que l'on approche donne un courant continu avec le disque. Cette tension est nommée potentiel minimum. On sait aussi que, une fois que la tension a atteint la valeur initiale nécessaire, il suffit d'une valeur plus faible pour que le courant passe d'une façon continue. On peut donc déterminer deux potentiels minima pour un dispositif expérimental donné.

La pointe était soudée dans une sphère de 1 centimètre de rayon isolée par une baguette de soufre de 10 centimètres de longueur. A la sphère était fixé un court fil de laiton de 4 millimètres de diamètre que l'on pouvait, par une rotation de la partie mobile, amener en contact avec l'électrode supérieure portant un fil de laiton courbé à angle droit. Ces deux fils étaient recouverts de cire à cacheter à leurs extrémités, de façon à éviter toute décharge de pointes qui aurait pu s'y produire. La mesure de la tension était faite au moyen d'un électromètre de Braun. On chargeait l'électrode sphérique jusqu'à la

tension de décharge, après que celle-ci avait été déterminée et l'on établissait le contact par rotation de la partie mobile, la tension tombait alors à une valeur désignée dans la suite par V_s.

Le tableau I indique les résultats obtenus dans une série de mesures pour une pointe en platine de $0^{mm},3$ de diamètre à la base et de $1^{mm},5$ de longueur.

TABLEAU I

N°	PRESSION en MM. HG.	ÉLECTRICITÉ — V_m SPHÈRE	ÉLECTRICITÉ — V_s SPHÈRE	ÉLECTRICITÉ — V avant LA CONNEXION	ÉLECTRICITÉ — V_s POINTE	ÉLECTRICITÉ + V_m SPHÈRE	ÉLECTRICITÉ + V_s SPHÈRE	ÉLECTRICITÉ + V avant LA CONNEXION	ÉLECTRICITÉ + V_s POINTE
		> 10 000		10 000	5 500	> 10 000		10 000	7 100
1	740	»	—	»	5 600	»	—	»	»
		»		»	5 500	»		»	»
		> 10 000		10 000	5 500	> 10 000		10 000	7 000
2	640	»	—	»	»	»	—	»	»
		»		»	»	»		»	7 100
		> 10 000		10 000	5 400	> 10 000		10 000	6 300
3	540	»	—	»	»	»	—	»	6 400
		»		»	»	»		»	6 500
		> 10 000		10 000	5 000	> 10 000		10 000	6 000
4	440	»	—	»	»	»	—	»	5 900
		»		»	»	»		»	»
		10 000	3 000	6 000	4 500	9 200	9 000	9 000	5 600
5	340	7 000	2 200	»	4 400	»	»	»	5 400
		6 400	»	»	4 600	»	»	»	5 500
		7 000	3 000	4 500	3 750	9 000	6 200	8 500	5 500
6	240	6 000	2 500	»	»	»	6 000	»	»
		4 800	2 000	»	»	»	»	»	»
		5 900	5 200	5 900	4 700	7 000	4 500	6 700	5 400
7	140	6 000	»	6 000	»	»	5 000	»	»
		»	»	»	»	»	4 500	»	»
		3 700	2 400	3 700	3 200	4 200	1 300	4 200	1 200
8	40	»	»	»	»	»	1 200	»	»
		»	»	»	»	»	»	»	»

Si, comme Ewers, on porte en ordonnées les valeurs du potentiel minimum et en abscisses les racines carrées des pressions, on doit obtenir des lignes droites. Il en est bien ainsi, pour les résultats d'expériences indiqués dans le tableau I, aux pressions comprises entre 140 et 540 millimètres. Entre 40 millimètres et 140 millimètres de pression, il y a un changement brusque d'inclinaison de la courbe, changement dû aux particularités de l'électricité positive que l'on observe avec des sphères ou avec des pointes émoussées. L'auteur a renouvelé ses expériences avec une pointe beaucoup plus fine et a trouvé les résultats réunis sur le tableau II.

On voit que, dans ces conditions, le potentiel minimum et la racine carrée de la pression sont bien liés par une fonction linéaire.

TABLEAU II

$\sqrt{p}$	5,5	11,4	15,4	18,8	20,7	23	25	27,4
$V_{s/100}$ —	15	17	18	22	24	28	28	32
$V_{s/100}$ +	22	26	30	35	38	42	46	48

L'auteur a étudié l'action du champ magnétique sur la décharge des pointes. Ce champ était produit par deux anneaux de fil analogues à l'anneau R. Un anneau avait 76 centimètres de diamètre et portait 450 tours : il produisait une intensité de champ de 7 unités C. G. S. par ampère de courant magnétisant; pour 40 ampères, on avait donc $H = 280$ C. G. S. L'action sur la

charge négative d'une pointe est très intense : l'effet de décharge produite par le champ magnétique est beaucoup plus faible quand la sphère voisine n'est pas reliée à la terre.

Conclusions. — Les résultats obtenus par l'auteur dans ces différentes séries d'expériences conduisent aux conclusions suivantes :

1° Quoique les expériences sur la décharge de pointes aient donné des résultats qui ne sont pas encore complètement expliqués, les expériences avec charge intérieure prouvent qu'il n'existe pas, avant la décharge, de courant non lumineux comme l'exigerait la théorie électrolytique de la décharge (J. J. Thomson).

Quand on choisit convenablement l'isolant qui supporte le conducteur chargé et que l'on évite tout fil extérieur placé dans l'air, l'isolement du vide est absolu pour des tensions inférieures à la tension de décharge. On ne peut déceler aucune dispersion qui accompagnerait nécessairement l'existence d'un courant non lumineux.

2° Dans les récipients larges, l'espace obscur n'est pas influencé par la présence d'une substance fortement ionisante, ce qui infirme l'hypothèse d'une région d'appauvrissement, dans le sens de la théorie électrolytique ;

3° Les essais sur la répartition de la charge ont indiqué qu'il n'existe pas d'inégalité de la capacité pour une charge positive ou négative : il n'existe donc pas, avant la décharge, une couche double telle que l'a supposé O. Lehmann ;

4° Les courants très faibles décelés par Elster et Geitel dans un espace vide d'air, courants sur lesquels Kaufmann a établi la caractéristique du courant non lumineux, n'existent pas dans un espace où il n'y a aucune ionisation préalable. Le phénomène de la décharge est, d'après les expériences, purement disruptif ;

5° L'intensité du champ électrique ne suffit pas seule à soustraire à leur attraction mutuelle les électrons dans la molécule : on doit donc admettre qu'il existe dans celle-ci des mouvements violents qui facilitent l'action du champ.

B. L.

***Sur le spectre de la lumière de l'azote produit par les rayons du radiotellure.* — B. Walter.** — *Drudes Annalen*, juin 1906.

Sir W. et Lady Huggins ont trouvé que le spectre de la lumière émise par le bromure de radium concorde avec celui de la lumière qui entoure le pôle négatif d'un tube de Geissler contenant de l'air raréfié, c'est-à-dire avec le spectre de la lumière négative de l'azote : plus tard différents expérimentateurs ont constaté qu'une telle lumière ne provient pas seulement des grains de radium eux-mêmes, mais aussi de l'air qui les environne jusqu'à une grande distance. L'air qu'entoure une plaque métallique recouverte de radiotellure (polonium), émet aussi, comme l'a constaté l'auteur, une lumière que l'on peut déceler assez facilement au moyen d'une plaque photographique. Les longueurs d'ondes émises appartiennent à la région de l'ultraviolet, principalement entre 350 et 290 millimètres.

L'auteur a exposé, pendant 1464 heures devant un spectrographe en quartz, une plaque de radiotellure de 4 centimètres de diamètre fraîchement préparée. Celle-ci était placée dans un récipent en laiton rempli d'azote sec à la pression atmosphérique, et sa surface active était parallèle à la direction de la pente et à l'axe du tube collimateur du spectrographe.

A côté du spectre ainsi obtenu sur la plaque photographique, l'auteur a enregistré un autre spectre obtenu, d'après la méthode indiquée par Imstedt et Meyer, au moyen de trois grains de bromure de radium de Giesel. Ces grains présentaient à la fente des surfaces d'environ $1 \times 0{,}4$, $0{,}6 \times 0{,}3$ et $0{,}4 \times 0{,}1$ millimètre. La durée d'exposition fut de 261 heures.

Sur une troisième portion de la même plaque, l'auteur a enregistré le spectre de la lueur négative d'un tube de Geissler contenant de l'air raréfié : la durée d'exposition fut de 10 secondes et le courant dans le tube de 1,0 milliampère.

Enfin, comme spectres de comparaison, l'auteur a photographié le spectre de la lumière anodique rouge et le spectre de la lumière cathodique bleue d'un tube de Geissler de 130 centimètres de longueur et 3 centimètres de diamètre intérieur fait en verre « uviol » de Schott und Genossen [1] : ce tube avait pour électrodes d'un côté un disque d'aluminium de 13 millimètres de diamètre perpendiculaire à l'axe, et de l'autre côté un fil d'aluminium de 2 millimètres de diamètre et 4 centimètres de longueur. Le tube était rempli d'air sec raréfié à la pression de $1^{mm},06$ et était traversé par un courant de 2 milliampères.

---

(1) Verre laissant passer les radiations ultraviolettes : voir *Éclairage Électrique*, tome XLIV, 5 août 1905, page LVIII.

La juxtaposition de ces différents spectres montre, à première vue, que les bandes médianes et celles placées à droite de $380^{\mu\mu},5$ à $297^{\mu\mu},7$ concordent à peu près complètement dans les quatre spectres : les bandes de gauche ne concordent plus ; celles du spectre de radium concordent avec le spectre de la lumière négative, et celles du radiotellure concordent avec le spectre de la lumière anodique. Après une étude attentive, on peut résumer de la façon suivante les résultats de ces expériences :

Le spectre de la lumière de l'azote excitée par le radium ne concorde plus avec le spectre de la lumière négative d'un tube de Geissler rempli d'air raréfié ; le spectre de la lumière de l'azote excitée par le polonium ne concorde plus, au contraire, avec le spectre de la lumière positive du tube de Geissler.

L'auteur ajoute qu'un tube rempli, à la pression de $2^{mm},90$, d'azote sec préparé au moyen du nitrate d'ammoniaque, a présenté à ses pôles, dans la région spectrale dont il s'agit, identiquement les mêmes spectres que le tube rempli d'air à $1^{mm},06$ de pression; en outre, les spectres de la lumière aux deux pôles d'une étincelle jaillissant entre deux pointes de platine présente, dans la région spectrale considérée, une grande concordance avec les spectres obtenus avec les tubes Geissler en verre Uviol.

B. L.

GÉNÉRATION ET TRANSFORMATION

Sur la marche en parallèle des alternateurs entraînés par des moteurs à gaz. — **Schüler.** — *Annalen der Elektrotechnik*, juin 1906.

L'auteur a eu l'occasion de faire sur ce sujet des expériences avec des moteurs à gaz de hauts fourneaux de la Cie Schalker Gruben-und Hüttenvereins Gelsenkirchen. Ces moteurs entraînaient des alternateurs triphasés à inducteur volant de 1 250 kilowatts sous 5 500 volts. Les pôles de ces machines étaient massifs, pour amortir les oscillations.

Dans les alternateurs accouplés à des moteurs à gaz, il se produit, par suite de la variation du couple moteur, une oscillation du flux inducteur par rapport au flux de l'induit qui tourne avec une vitesse uniforme. Il résulte de ces oscillations la production de courants de circulation entre les différents alternateurs couplés en parallèle ; ces courants de circulation ont une intensité qui dépend de l'amplitude des oscillations les unes par rapport aux autres et, par suite, celle-ci ne doit pas dépasser une certaine valeur sans quoi la marche en parallèle est compromise. Si, par exemple, le décalage des pôles par rapport au champ pour une charge donnée d'une machine est de 20° électriques, on peut tolérer encore un mouvement pendulaire de $\pm 2°$, car une oscillation d'environ 10 % du courant total n'est pas dangereuse pour la marche en parallèle. Le décalage des pôles par rapport au champ dépend du rapport C des ampère-tours secondaires aux ampère-tours primaires, qui, dans une bonne machine, doit être compris entre 0,3 et 0,5.

Le degré d'uniformité des machines qui doivent fonctionner en parallèle doit donc être choisi de telle façon que le mouvement pendulaire résultant des variations du couple moteur soit au plus de $\pm 2°$ électriques. L'auteur donne une série de diagrammes indiquant les relations entre le degré d'uniformité, le nombre de temps moteurs par tour, le nombre de paires de pôles et le décalage. Il faut tenir compte aussi de la résonance. Si un volant en rotation reçoit une impulsion motrice, il oscille avec une période

$$t = \text{constante} \sqrt{\frac{\text{moment d'inertie}}{\text{force directrice}}}.$$

Si les impulsions motrices se produisent à des intervalles de temps multiples impairs de cette période t, il se produit une résonance et les oscillations vont en s'amplifiant jusqu'au décrochage de la machine. Même si le rapport t/T n'est pas exactement un nombre entier, mais en est voisin, par exemple s'il est égal à 1,1, 3,1, etc., la marche en parallèle n'est pas possible. Il est bon de choisir comme valeurs de ce rapport les valeurs 4 ou 8. Le rapport C doit être choisi au maximum égal à 0,5, sans quoi il se produit une trop forte chute de tension ; en général, on ne descend pas au-dessous de 0,3, car il faut placer trop de cuivre sur les inducteurs et le prix d'établissement de la machine est trop élevé.

Dans les essais faits sur les moteurs à gaz entraînant des alternateurs de 1 250 kilowatts sous 5 500 volts, l'auteur a obtenu les résultats suivants :

La charge était obtenue par l'emploi d'un rhéostat liquide et l'intensité des courants triphasés était de 130 ampères. Pour la tension de

5500 volts (normale), il y avait un faible courant d'égalisation : le rapport t/T avait pour valeur presque exactement 4 ; la marche en parallèle était bonne. Pour une tension de 4200 volts, il se produisait un courant de circulation très intense et la marche en parallèle était impossible. Le calcul indique que, pour 4000 volts, on a $t/T = 3$, c'est-à-dire qu'on est dans les conditions de résonance complète.

B. L.

Sur les commutatrices et les moteurs-générateurs. — **P. Fowler.** — *Electrical World*, 26 mai 1906.

L'auteur établit une comparaison entre les commutatrices et les moteurs générateurs pour la conversion des courants alternatifs en courant continu. Pour cela il étudie successivement, pour les deux types de machines, le rendement, l'encombrement et le prix, le réglage et la variation de tension, la capacité de surcharge, les méthodes de démarrage, le pompage, le facteur de puissance, la fréquence, la réversibilité.

Pour établir une comparaison reposant sur des bases pratiques, l'auteur exclut le moteur générateur asynchrone et suppose qu'il s'agit seulement de groupes composés chacun d'un moteur synchrone et d'une dynamo génératrice. Ces groupes ont l'avantage de permettre le réglage du facteur de puissance au moyen de l'excitation et l'amélioration du facteur de puissance de tout le réseau sur lequel ils sont branchés. L'induit du moteur synchrone est supposé bobiné pour haute tension (6600 volts) et alimenté directement par les courants de la ligne : le moteur est donc du type à inducteur tournant.

1° *Rendement.* — Pour établir des comparaisons efficaces, il faut considérer le rendement total du système employé pour convertir les courants alternatifs à haute tension en courant continu : ce rendement total dépend pour l'un des systèmes, des pertes dans les transformateurs et la commutatrice, et, pour l'autre système, des pertes dans le moteur et dans la génératrice. Dans ces conditions, la commutatrice présente un rendement plus avantageux que le moteur générateur, surtout aux faibles charges. Cette différence de rendement est un des plus sérieux inconvénients du moteur générateur, et doit empêcher son emploi dans les sous-stations alimentées par une usine génératrice à vapeur, où le combustible représente une part importante des frais totaux d'exploitation. Le rendement d'une commutatrice à 25 périodes est meilleur que celui d'une commutatrice à 60 périodes ; pour le moteur générateur, les rendements sont à peu près les mêmes à ces deux fréquences.

Encombrement et prix. — Le prix par kilowatt d'une commutatrice de 500 kilowatts 60 périodes 575 volts et des transformateurs abaisseurs de tension est de 77 fr. 50 ; celui d'un moteur générateur répondant aux mêmes conditions est de 95 francs. Pour 25 périodes, les prix sont respectivement de 80 et de 100 francs. La commutatrice possède une plus grande puissance par kilogramme de matériaux actifs.

En ce qui concerne l'encombrement en surface, le moteur générateur occupe moins de place que la commutatrice et ses transformateurs, mais ceux-ci peuvent être placés au-dessus des commutatrices dans une galerie spéciale, et alors l'encombrement en plan de la commutatrice est plus faible que celui du moteur transformateur. Si les transformateurs sont placés au même étage que la commutatrice, les encombrements superficiels sont les suivants : pour une commutatrice de 500 kilowatts à 60 périodes, un mètre carré par 45 kilowatts ; pour un moteur générateur, un mètre carré par 62,5 kilowatts ; pour une commutatrice à 25 périodes 48,5 kilowatts par mètre carré ; pour un moteur générateur, 62 kilowatts par mètre carré.

Réglage de la tension. — Avec la commutatrice, toute variation produite sur le réseau alternatif se reproduit évidemment sur le réseau continu : pour les machines de traction, où la constance de la tension n'est pas aussi nécessaire que pour les machines d'éclairage, on obtient de bons résultats en employant des enroulements inducteurs compound et en intercalant une réactance convenable entre la commutatrice et les transformateurs qui l'alimentent. Quand un réglage précis est nécessaire, pour l'alimentation des réseaux d'éclairage, par exemple, on emploie un appareil du genre d'un régulateur d'induction réglé à la main et permettant de faire varier la tension alternative. Avec le moteur générateur, la tension du côté continu peut être réglée à volonté indépendamment de la tension alternative ; la méthode de réglage présente une grande simplicité.

Capacité de surcharge. — Par suite de l'effet de compensation qui se produit entre les cou-

rants alternatifs et le courant continu dans les induits des commutatrices, les pertes dans le cuivre sont moins élevées dans ces machines, et l'échauffement étant réduit, la puissance de la machine peut être augmentée comparativement à celle d'une génératrice à courant continu. La diminution d'échauffement varie avec le nombre de phases : l'échauffement produit par une charge donnée dans un induit de dynamo génératrice étant pris pour unité, l'échauffement a pour valeur 0,555 dans une commutatrice triphasée, 0,37 dans une commutatrice diphasée et 0,26 dans une commutatrice hexaphasée. L'échauffement étant proportionnel au carré des courants, les puissances relatives pour un même échauffement peuvent être obtenues facilement. On obtient ainsi les puissances comparatives suivantes : dynamo génératrice 1 ; commutatrice triphasée 1,34 ; commutatrice diphasée 1,64 ; commutatrice hexaphasée 1,96. On voit donc que, à ce point de vue, la commutatrice est très supérieure au moteur générateur. En outre, la charge maxima que peut supporter une commutatrice ne dépend que de l'échauffement des conducteurs induits et ne dépend pas du couple mécanique, puisqu'il n'y a pas transmission de puissance mécanique du côté alternatif au côté continu comme dans le cas du moteur générateur.

Démarrage. — La commutatrice et le moteur générateur synchrone sont à peu près équivalents au point de vue du démarrage ; celui-ci doit être effectué du côté continu ou bien au moyen d'un moteur auxiliaire.

Pompage. — La tendance au pompage est la même pour les deux types de machines. Les dispositifs amortisseurs (Leblanc) donnent de bons résultats avec la commutatrice. Avec les moteurs synchrones bobinés pour la haute tension et munis, par conséquent, d'un petit nombre d'encoches, l'emploi de tels expédients est à rejeter à cause de la production excessive de courants de Foucault dans les circuits amortisseurs. La tendance au pompage croît avec la fréquence ; les commutatrices à fréquence élevée sont plus sensibles à ce point de vue que les moteurs générateurs, par suite du fait que les commutatrices à fréquence élevée ne peuvent être établies d'une façon satisfaisante avec une réaction d'induit suffisante pour produire la stabilité nécessaire.

Facteur de puissance. — La commutatrice n'exerce pas de couple appréciable sur son arbre : pour un champ constant, le facteur de puissance est pratiquement indépendant de la charge sur le côté continu. Ce fait est nettement vérifié par les résultats suivants d'expériences faites par l'auteur sur des commutatrices shunt desservant un réseau de traction et présentant une puissance de 1 500 kilowatts en triphasé à 25 périodes avec une tension de 600 volts du côté continu.

CHARGE A COURANT CONTINU	COURANT D'EXCITATION	FACTEUR DE PUISSANCE
kilowatts.	ampères.	
0	8,5	0,99
375	—	—
630	—	—
935	—	—
1 240	—	—
1 420	—	—
1 520	—	—

Comme on l'a dit précédemment, on emploie généralement, dans les installations de traction, des bobines inductrices-série et une bobine de réactance intercalée sur le circuit alternatif. Quand la valeur de la réactance est convenablement choisie, et que le courant dans les bobines-série a été réglé à une valeur appropriée au moyen d'un shunt, le facteur de puissance peut être maintenu à une valeur très élevée pour des charges assez différentes. On peut modifier le shunt des bobines-série de telle façon que la valeur 100 °/₀ du facteur de puissance soit obtenue à pleine charge ou à trois quarts de charge.

Dans le cas du moteur générateur, les choses sont différentes à cause de la transmission de puissance mécanique du moteur à la génératrice. On est dans le cas bien connu du moteur synchrone simple surmontant un couple résistant, et, dans ces conditions, il existe pour chaque valeur du flux, une charge critique pour laquelle le courant est en phase avec la différence de potentiel agissante. Pour que le facteur de puissance conserve la même valeur pour différentes charges en continu, il faut un réglage continuel du courant d'excitation pour éliminer, à chaque instant, la composante déwattée du courant. En outre, si le moteur synchrone du groupe est excité par du courant pris aux bornes de la

génératrice qu'il entraine, ce qui est généralement le cas, et si cette dernière machine est du type compound, le facteur de puissance est très instable.

Fréquence. — Avec le moteur générateur composé de deux machines électriquement indépendantes l'une de l'autre, chacune peut être établie d'une façon quelconque, puisque les deux machines n'ont de commun que la vitesse de rotation déterminée par le nombre de pôles du moteur. Celui-ci peut être établi sans aucune difficulté pour des fréquences quelconques, comprises entre 25 et 60 périodes par seconde.

En ce qui concerne la commutatrice, les conditions sont tout à fait différentes, puisqu'il faut prendre un compromis entre la solution la plus avantageuse au point de vue du courant continu et la solution la plus avantageuse au point de vue du courant alternatif. Le fonctionnement de la machine est excellent à la fréquence 25 : c'est cette fréquence qu'emploient toutes les grandes installations de transmission d'énergie électrique utilisant des commutatrices. Pour les fréquences plus élevées, la commutatrice présente une tendance au pompage, par suite de la distance limitée entre pôles et de la difficulté d'établir une machine ayant une forte réaction d'induit. La vitesse de rotation à laquelle on est conduit pour des fréquences élevées rend la commutation difficile. L'arc de collecteur compris entre un porte-balais positif et un porte-balais négatif étant très faible, la machine est très sensible au moindre déplacement du point neutre : il est difficile de remplacer un balai en marche ; les porte-balais doivent appuyer fortement sur le collecteur à cause de la vitesse périphérique élevée de celui-ci. Un certain nombre d'artifices de construction ont cependant permis d'établir des commutatrices à 60 périodes fonctionnant parfaitement.

Réversibilité. — Quoique les commutatrices ne soient pas très aptes à convertir des courants continus en courants alternatifs, à cause de leur forte réaction d'induit, elles peuvent cependant fonctionner exceptionnellement de cette façon. Quand une commutatrice ainsi employée alimente un réseau de faible facteur de puissance, l'effet démagnétisant est tel que la machine atteint une vitesse dangereuse si elle n'est pas pourvue d'un régulateur de vitesse.

Avec le moteur générateur qui possède deux systèmes inducteurs distincts, il est évident que les réactions qui se produisent sur l'un d'eux n'interviennent pas sur l'autre.

En résumé, on voit d'après ce qui précède que chaque type de machine présente des avantages et des inconvénients qui font qu'elles peuvent trouver dans chaque cas particulier une application distincte. La commutatrice est d'un emploi plus avantageux dans les systèmes de distribution urbains alimentant des lampes et des moteurs et desservis par une usine génératrice de faible puissance à faible fréquence. Le moteur générateur doit être préféré quand la sous-station est alimentée par une usine génératrice présentant un faible réglage et dans le cas de fréquences élevées. R. R.

***Sur les commutatrices.* — K. Klein.** — *Annalen der Elektrotechnik*, juin 1906.

La transformation des courants alternatifs monophasés ou polyphasés est produite au moyen de groupes moteurs-générateurs ou de commutatrices. En Amérique on emploie surtout des commutatrices ; en Allemagne, au contraire, on a recours généralement aux moteurs-générateurs. L'auteur passe en revue les conditions électriques dans lesquelles se trouvent les commutatrices et se limite au type de machines le plus employé, la commutatrice triphasé-continu.

Les tensions des deux courants (triphasé et continu) doivent être entre elles dans un rapport constant, puisqu'un seul enroulement sert pour les deux courants. Si par exemple le courant continu doit être produit sous une différence de potentiel de 100 volts, le calcul indique que les courants triphasés doivent avoir une tension composée de 61,2 volts efficace : avec le montage ouvert des transformateurs (hexaphasé), la tension doit être de 70,7 volts, si l'on admet que la courbe des courants est sinusoïdale et que le cos φ est égal à l'unité. Il faut employer un transformateur triphasé ou un groupe de trois transformateurs monophasés pour réduire la tension : le point neutre de l'enroulement de ceux-ci peut être avantageusement relié au conducteur neutre de la distribution à courant continu, si celle-ci est à trois fils. Le courant passant dans les enroulements induits de la commutatrice est la résultante des courants triphasés amenés aux bagues et du courant continu recueilli au

collecteur. Le réglage de la tension continue produite ne peut être effectué que par le réglage de la tension des courants triphasés, car une augmentation très considérable de l'excitation ne produit qu'une augmentation de quelques centièmes de la tension continue. Le réglage peut être assuré au moyen d'une bobine de réactance triphasée intercalée entre le secondaire du transformateur et les bagues de la commutatrice; les variations de tension ainsi obtenues peuvent atteindre 25 %. Pour obtenir des variations de tension plus considérables, on est réduit à fractionner les enroulements secondaires du transformateur et à utiliser une plus ou moins grande portion de ces enroulements. Si l'on doit pouvoir faire varier la tension d'une façon continue, il est bon d'employer un régulateur d'induction ou survolteur-dévolteur.

La puissance d'une commutatrice polyphasée est plus élevée que celle d'une dynamo génératrice de mêmes dimensions, à cause des pertes plus faibles dans l'induit. Les conditions de fonctionnement étant d'autant meilleures que le nombre de phases est plus considérable, on emploie généralement le mode de groupement hexaphasé. Le rendement d'une commutatrice d'une certaine puissance, y compris les rendements des transformateurs, est de 91 % environ : au contraire, le rendement d'un groupe moteur-générateur avec transformateur est de 85 %. L'encombrement d'une commutatrice est plus faible; les frais d'installation sont moins élevés.

Le démarrage des commutatrices polyphasées est généralement effectué par le côté continu; l'accrochage sur les courants polyphasés est fait au moment où la machine est en place avec le réseau. Si l'on ne dispose pas de courant continu pour le démarrage, on effectue celui-ci sur les courants triphasés : on peut faire tourner la machine comme moteur synchrone ou bien la lancer au moyen d'un petit moteur asynchrone.

L'auteur termine en concluant que la commutatrice réunit les avantages que présentent les moteurs asynchrones, les moteurs synchrones et les machines à courant continu, et qu'elle doit être préférée au groupe moteur-générateur.

B. L.

***Sur le réglage de la tension de décharge des batteries d'accumulateurs servant pour l'éclairage.* — E.-P. Hollis et E.-R. Alexander.** — *The Electrician*, 25 mai 1906.

Dans une batterie en décharge, la différence de potentiel aux bornes ne reste pas constante, mais diminue peu à peu : il est donc nécessaire d'employer un système de réglage pour assurer la constance de la différence de potentiel aux bornes du réseau de distribution. Il y a, pour cela, deux méthodes : celle du survolteur, et celle des éléments de réduction. Avec la première méthode, il faut, en plus de la batterie d'accumulateurs, un survolteur capable de supporter le courant maximum de décharge et de produire la différence de potentiel nécessaire pour relever la tension à la valeur convenable pour la charge et la décharge; avec la deuxième méthode, il faut, en plus de la batterie normalement nécessaire, un certain nombre d'éléments en surplus, un réducteur de décharge, et un survolteur pour la charge à fond de la batterie. Plusieurs auteurs ont donc indiqué, dans différents mémoires ou travaux, que, dans le choix d'une de ces deux méthodes, la balance devait pencher en faveur de la première, à cause de la suppression des frais d'achat et d'entretien des éléments supplémentaires dits éléments de réduction.

L'auteur s'est proposé d'étudier la question et de montrer que cette opinion n'est pas entièrement justifiée.

Soit une batterie dont la tension à vide est E et soit V la tension à une période quelconque de la décharge. Soit C le courant total et C_o le courant fourni par la batterie : le courant absorbé par le moteur sera $C_o - C$; le survoltage sera $E - V$ et la puissance du survolteur sera $C_o(E - V)$. Soit η le rendement de cette machine. La puissance absorbée par le moteur est $C_o(E - V)/\eta$ et le courant est

$$C_o(E - V)/\eta E = C_o - C.$$

On a donc :

$$C_o = C + \frac{C_o(E - V)}{\eta E} \quad (1)$$

$$\frac{C}{C_o} = 1 - \frac{E - V}{\eta E}. \quad (2)$$

Ces formules peuvent servir pour déterminer exactement la capacité de la batterie et du survolteur.

Pour assurer une décharge à voltage constant, il faut employer une batterie susceptible de donner un nombre d'ampère-heures supérieur à celui qu'exige le réseau à alimenter, ou bien il faut employer des éléments de réduction. Dans le premier cas, on doit adopter un type

d'éléments plus puissant; dans le second cas on doit prendre un plus grand nombre d'éléments. La question qui se pose est de savoir quelle est la solution la plus économique.

Les équations qui précèdent donnent un moyen pour déterminer quelle doit être la capacité de la batterie pour des conditions déterminées de décharge à travers un survolteur. Il suffit, pour cela, de posséder la courbe de rendement du survolteur et la courbe de décharge d'un élément, et l'on obtient aussi la valeur de la capacité que doit présenter chaque élément.

Soit une batterie de 2 000 ampère-heures (1 000 ampères en 2 heures) sous 500 volts; cette batterie est supposée déchargée au régime de 1 000 ampères à travers un survolteur. Le tableau qui suit indique la valeur des différentes grandeurs intéressantes, le voltage de décharge de chaque élément ayant été déterminé d'après la courbe de décharge. Le survoltage nécessaire par élément est égal à la différence entre le voltage à vide (2,15 volts) et les voltages existant à un instant donné : le survoltage maximum a lieu à la fin de la décharge, moment où le survolteur travaille à pleine charge; le rapport de la charge du survolteur à un moment donné à la pleine charge (en °/₀) peut être calculé sur cette base et peut servir à déterminer le rendement de cette machine. Les rendements indiqués sur le tableau ont été pris sur les courbes de machines de 150 kilowatts. Les courants dans le moteur ont été calculés d'après les équations établies plus haut, et le courant fourni au réseau est égal au courant de la batterie diminué du courant dans le moteur.

DURÉE de la DÉCHARGE	VOLTS PAR ÉLÉMENT	SURVOLTAGE NÉCESSAIRE par élément.	CENTIÈMES DE LA PLEINE CHARGE du survolteur.	RENDEMENTS			COURANTS	
				MOTEUR	SURVOLTEUR	TOTAL	MOTEUR	RÉSEAU
	1,935	0,215	64	0,850	0,870	0,739	135	865
15 min. .	1,930	0,220	66	0,853	0,873	0,745	138	862
30 min. .	1,915	0,235	70	0,859	0,879	0,755	144	856
45 min. .	1,900	0,250	74	0,865	0,885	0,766	152	848
1 heure. .	1,890	0,260	78	0,869	0,889	0,773	157	843
15 min. .	1,875	0,275	82	0,875	0,893	0,781	164	836
30 min. .	1,860	0,290	86	0,878	0,895	0,785	172	828
45 min. .	1,840	0,310	92	0,880	0,898	0,790	183	817
2 heures. .	1,815	0,335	100	0,882	0,900	0,794	195	805

En prenant la moyenne des deux dernières colonnes, on obtient les résultats suivants :

Courant de décharge moyen de la batterie.	1 000 ampères.
Courant moyen absorbé par le réseau.	840 —
Courant moyen absorbé par le moteur.	160 —
Capacité de la batterie. .	2 000 amp.-heures.
Capacité de (batterie + survolteur)..	1 680 —
Coefficient du système. .	1 680/2 000 = 0,84

On voit donc que l'emploi du survolteur conduit à adopter des éléments de 2 000 ampère-heures au lieu de 1 680, soit de 19,1 °/₀ plus puissants. Dans ce cas, il faut 233 éléments. Si l'on employait la méthode de réglage avec éléments de réduction, il faudrait d'abord 233 éléments de 1 680 ampère-heures, puis un certain nombre d'éléments de réduction que l'on calcule de la façon suivante. A la fin de la décharge, chaque élément donne 1,815 volts, soit 422,9 volts pour la batterie totale. Il faut donc que les éléments de réduction fournissent 77ᵛ,1 volts. Les éléments ont des voltages inégaux, puisqu'ils sont inégalement déchargés. Au début, il y a une chute rapide de 0,215 volt par élément, soit 50,1 volts au total, ce qui exige l'adjonction de 26 éléments. Les autres éléments de réduction doivent être mis en service l'un après l'autre et ont un voltage un peu plus élevé que les éléments de la batterie : ce voltage est en moyenne de 1,875 volt. Donc, pour compenser les 27 volts qui restent à fournir, il faut 15 éléments. Au total il faut donc 26 + 15 = 41 ou 42 éléments de réduction. Le nombre total d'éléments de la batterie est donc 275.

On a donc, dans un cas, 233 éléments de 2 000 ampères-heure, et, dans l'autre cas, 275 éléments de 1 680 ampères-heure. Avec la deuxième méthode, on a augmenté le nombre d'éléments de 275 — 233 ou 15,3 °/₀. Avec la première méthode, on a augmenté la capacité de 2 000 — 1 680 = 16 °/₀. On arrive donc à peu près au même résultat, et la différence de prix de revient est tout à fait négligeable.

Quand on emploie le système de réglage avec survolteur-dévolteur, il faut une machine spéciale. Avec le système des éléments de réduction, il n'est pas nécessaire d'avoir un survolteur

spécial : celui-ci ne sert que pour la charge, et l'on peut s'en passer en reliant en série deux machines à 500 volts, pourvu que leur rhéostat de champ soit suffisant.

Le rendement des deux systèmes est pratiquement le même. Les pertes à la décharge avec le système du survolteur sont $E(C_0 - C)(1 - \eta)$ et représentent 4 °/₀ environ de la puissance débitée par la batterie. Les pertes dans le système avec éléments de réduction sont à peu près nulles.

Quand on emploie le système avec éléments de réduction, il faut un réducteur de décharge, que l'on doit placer aussi près que possible des accumulateurs pour éviter l'installation de grandes longueurs de câbles à forte section.

R. R.

OSCILLATIONS HERTZIENNES & TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

Télégraphie sans fil dans une direction unique. — **F. Braun** (*fin*) ([1]). — *The Electrician*, 1er juin 1906.

Les expériences furent faites auprès de Strasbourg. Des poteaux en bois de 20 mètres de hauteur furent plantés aux sommets d'un triangle équilatéral de 30 mètres de côté. Les fils aériens, ayant chacun 33 mètres de longueur environ, étaient terminés par des toiles métalliques N_1 et N_2 (fig. 3) parallèles au sol et

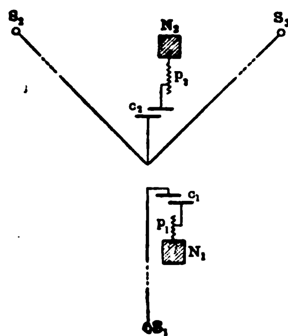


Fig. 3.

placées à une faible distance de celui-ci. N_1 était constituée par du fil de cuivre et avait 3 mètres carrés de surface ; N_2 était en fil de fer et avait 4 mètres carrés. Les capacités variables c_1 et c_2 et les self-inductances variables p_1 et p_2 étaient employées pour l'accord des fréquences du système. Du poste placé au centre du triangle, les fils partaient horizontalement, à une hauteur de 2m,50 au-dessus du sol, et atteignaient les poteaux : ces fils étaient directement excités par des circuits contenant de la capacité. En choisissant un degré d'accouplement convenable, on peut obtenir dans les trois fils des oscillations de fréquence égale et dont le rapport des amplitudes ait une valeur déterminée. La seconde oscillation, qui existe dans chaque système, était beaucoup plus faible et différait sensiblement dans les deux systèmes. D'ailleurs les courbes de résonance des deux systèmes présentaient des différences appréciables dans les décréments logarithmiques de l'oscillation lente et de l'oscillation rapide. La longueur de l'onde la plus longue était de 120 mètres environ, et celle de l'onde la plus courte dans le système I était de 150 mètres environ, et, dans le système II, de 165 mètres environ.

Les différences de phase nécessaires peuvent être calculées d'après les dimensions et étaient de $180 - 78$ degrés pour un minimum absolu dans la direction $\alpha = 0$ et de $180 + 78$ degrés pour un minimum absolu dans la direction $\alpha = 180°$. Ces différences de phase étaient produites par la méthode de Papalexi et Mandelstam. Elles étaient mesurées par la méthode décrite par l'auteur. Des bolomètres de faible résistance (environ 1,10 ohm) étaient employés comme appareils de mesure et étaient utilisés avec le montage du pont indiqué par Tissot. Le galvanomètre portatif était du type Desprez-d'Arsonval avec miroir. La distance de l'échelle était de 50 centimètres et une division de celle-ci correspondait à une intensité de courant de 6×10^{-9} ampères. La résistance du circuit du galvanomètre était de 1 050 ohms.

Des expériences furent faites pour élucider les deux points suivants : étude du champ dans le cas d'un décalage déterminé ; étude de l'influence produite par le champ lors d'une modification du décalage.

1° *Étude du champ dans le cas d'un décalage déterminé.* — Si l'on suppose que les trois fils transmetteurs soient égaux, et que les conditions autour du triangle transmetteur soient symétriques dans toutes les directions, on peut déplacer le champ de 120° en intervertissant les conditions des fils transmetteurs. Si l'on suppose, par exemple, que l'oscillation en S_1 passe par la

([1]) Voir *Eclairage Electrique*, tome XLVII, 23 juin 1906, page 473.

valeur zéro pendant que les oscillations en S_2 et S_3 ont la phase δ (avec les amplitudes correspondantes), et si l'on excite S_2 avec la phase o tandis que S_1 et S_3 sont excités avec la phase δ, le champ sera décalé de 120°. En répétant cette opération, on peut déplacer à nouveau le champ de 120°. Il est possible d'étudier le champ avec un poste fixe d'observation, pour les azimuts de 0, 120 et 240°. Les modifications peuvent être effectuées au moyen d'un commutateur approprié au poste transmetteur placé au centre du triangle. On a observé, dans le cours des expériences, que les systèmes oscillaient différemment avant et après le changement de connexions, ce qui indique que les trois fils transmetteurs n'étaient pas électriquement égaux. Les observations faites au point fixe présentent aussi des dissymétries. Il en résulte que le champ n'était pas nul. même quand les condition de champ nul pour la direction $\alpha = 0$ étaient satisfaites. Dans les expériences, par exemple, le champ maximum mesuré dans la direction $\alpha = 0$ était $E^2 = 30$, et le champ ne pouvait pas être réduit à zéro, mais seulement à la faible valeur $E^2 = 2$.

A cause des dissymétries, dues à la présence d'arbres et de bâtiments, des observations furent faites également en deux autres points E_2 et E_3 (fig. 4). Le point fixe E_1 était à 1 300 mètres

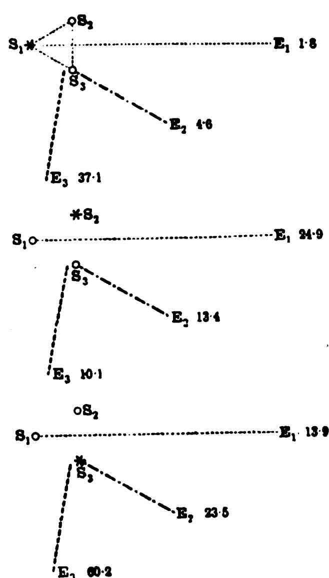


Fig. 4.

environ du système transmetteur et dans la direction donnée par la condition $\alpha = 0$. Le fil récepteur en ce point était fixé à un poteau de 20 mètres de hauteur. Les mesures furent faites avec un bolomètre possédant un vide poussé. Le fil de platine du bolomètre avait $0^{mm},02$ de diamètre ; sa résistance était de 10 ohms environ. Le fil du bolomètre était relié en série avec l'antenne réceptrice au moyen d'une bobine variable et d'un condensateur variable. Le courant auxiliaire était fourni par deux accumulateurs dont le circuit présentait une résistance de 70 ohms. Le galvanomètre portatif et son circuit avaient une résistance totale de 550 ohms. Aux postes récepteurs E_2 et E_3, l'antenne était supportée par un poteau formé de deux parties : la partie inférieure était constituée par un poteau de bois de 8 mètres de hauteur et la partie supérieure par un tube de bronze de 7 mètres de hauteur. Les distances de E_2 et E_3 au triangle étaient de 600 et 650 mètres. La figure 4 indique les résultats obtenus dans ces expériences. Les chiffres portés sur cette figure à côté des points d'observation E_1 (fixe) et E_2 ou E_3 (mobiles) indiquent les valeurs moyennes des lectures du galvanomètre et sont, par suite, proportionnels au carré de l'intensité de champ aux points d'observation. La sensibilité du bolomètre était à peu près la même dans tous les cas, mais on ne peut comparer directement entre elles que les lectures obtenues au même point d'observation. Le fil transmetteur de phase zéro est indiqué par un astérisque ; les fils avec phases décalées sont figurés par des petits cercles. La figure 5

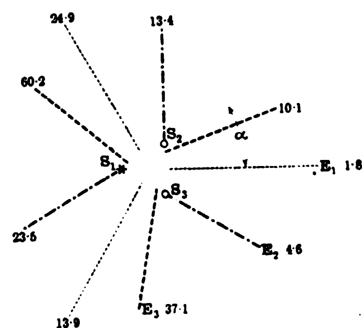


Fig. 5.

représente la distribution complète autour du triangle si l'on suppose que l'interversion des fils produit seulement une rotation du champ de 120°. Le tableau II indique les valeurs calculées du carré de l'intensité du champ. On voit que celui-ci dépend beaucoup de l'azimut, comme on

pouvait s'y attendre, et l'action perturbatrice des dissymétries existantes est visible.

TABLEAU II

$\delta = 80°$, $S_1 = 1$, $S_2 = S_3 = 0,5$.

α	6	30	60	90	120	150	180
E^2	1,46	2,94	8,51	17,45	27,77	26,57	39,98

2° *Étude de l'influence d'une modification de la différence de phase.* — Le poste récepteur ne fut pas modifié ($\alpha = 0$), mais la différence de phase au poste transmetteur fut modifiée et mesurée, et des observations furent faites avec le bolomètre sur les amplitudes du champ résultant. Pendant ces expériences, les fils furent successivement intervertis, de sorte que les champs fussent obtenus pour les azimuts $\alpha = 0$, 120° et 240°. Le tableau III indique les valeurs calculées des champs pour des différences de phase voisines de celles employées dans les expériences. Le tableau IV indique les plus grandes valeurs observées, ainsi que les valeurs calculées et les valeurs approchées. Les résultats de ces expériences dépendent d'un grand nombre de facteurs, tels que, par exemple, la régularité de l'interrupteur à turbine actionnant la bobine d'induction, la décharge, la sensibilité du bolomètre, etc. La concordance trouvée dans ces conditions défectueuses est surprenante.

TABLEAU III

Valeurs calculées du carré de l'intensité de champ.

α	E^2	E^2	E^2	E^2
0°	1,384	0,146	2,616	3,854
30°	1,612	0,294	2,094	3,412
60°	2,162	0,851	1,046	2,357
90°	2,725	1,745	0,275	1,255
120°	3,140	2,777	0,068	0,431
150°	3,685	3,657	0,021	0,049
180°	3,340	3,998	0,640	0,002
$\delta =$	30°	80°	210°	260°

Si rien ne détruisait la symétrie, les valeurs observées pour le champ seraient les mêmes dans le tableau B que dans le tableau C. Les différences constatées montrent l'existence de perturbations. Néanmoins, les expériences montrent que le champ peut être calculé, d'après les bases indiquées, avec une exactitude suffisante pour la pratique.

TABLEAU IV

Valeurs observées.

A, le point d'observation étant dans la direction $\alpha = 0$.

	DIFFÉRENCE DE PHASE	CARRÉ DE L'INTENSITÉ DE CHAMP Obs.	Calcul.
•S_2	27°	22,0	14,7
•S_1	77°	3,0	1,6
	207°	17,0	27,3
•S_3	257°	40,3	40,0
B, le point d'observation étant dans la direction donnée par $\alpha = 120°$.			
•S_2	27°	27,5	33,0
•S_1	77°	30,1	30,0
	207°	1,8	0,8
•S_3	257°	8,0	4,0
C, le point d'observation étant dans la direction donnée par $\alpha = 240°$.			
•S_2	27°	19,7	»
•S_1	77°	18,3	»
	207°	1,5	»
•S_3	257°	13,8	»

3° *Quelques autres champs.* — Le diagramme de la figure 6, sur laquelle sont indiqués les différents paramètres, est relatif à un dispositif de forme plus ou moins parabolique. La phase de I est 0, la phase de II et III est — 90°; la phase de IV et V est — 180°. L'amplitude de I est 1; celle de II et III est 1; celle de IV et V est 0,5.

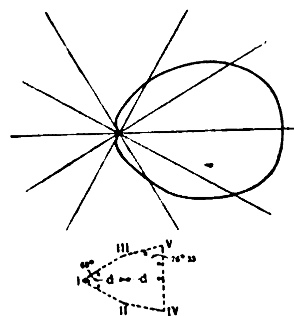


Fig. 6.

La figure 7 montre que la distribution du

champ approche de plus en plus de celle d'un fil transmetteur qui radie avec des intensités égales dans toutes les directions. Dans cette figure,

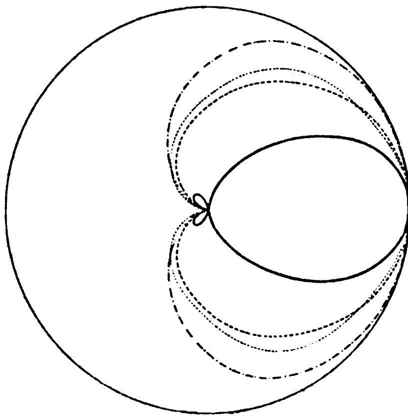


Fig. 7.

chaque vecteur représente l'intensité de champ elle-même et non le carré de celle-ci. La courbe intérieure tracée en traits pleins se rapporte au cas de quatre transmetteurs disposés aux angles d'un rectangle pour lequel $a = 0{,}25l$ et $b = 0{,}5l$: on avait $\delta = 270°$. La courbe tracée en traits-points est relative au cas de deux transmetteurs placés à une distance $a = 0{,}25l$: $\delta = 270°$; $S_1/S_2 = 1/1$. La courbe en pointillés se rapporte au cas de trois transmetteurs placés aux sommets d'un triangle équilatéral de côté $a = 0{,}25l$: $\delta = 270°$; $S_1/S_2/S_3 = 1/0{,}5/0{,}5$. La courbe en traits interrompus est relative au cas de quatre transmetteurs placés aux angles d'un carré de côté $a = 0{,}25l$: $\delta = 270°$:

$$S_1/S_2/S_3/S_4 = 0{,}5/0{,}5/0{,}5/0{,}5.$$

Le cercle extérieur indique, en comparaison, le champ d'un transmetteur radiant d'une façon uniforme dans toutes les directions.

L'auteur a étudié le champ produit par un transmetteur placé à proximité de l'arc d'un miroir parabolique de Hertz. Dans cette expérience, la longueur du miroir était à peu près égale à sa hauteur, et la place du transmetteur fut déterminée expérimentalement pour obtenir les meilleurs résultats. L'étude était faite avec un résonateur de Righi : on déterminait les différentes distances auxquelles le résonateur cessait d'être influencé et l'on marquait ces distances sur le sol : on obtenait ainsi une courbe analogue à la courbe intérieure de la figure 7, mais moins allongée. Il est facile de voir que les deux courbes ont la même signification. Soit f l'intensité du champ à la distance unité du transmetteur et ρ le vecteur de la courbe de champ correspondant à la direction déterminée : on a $f = c\rho$. L'intensité de champ φ dans la même direction, mais à une distance r est $\varphi = f/r$. Si l'on suppose que le récepteur cesse d'agir quand l'intensité de champ est abaissée à une certaine valeur φ_0, on peut écrire $\varphi_0 = f/R$, en appelant R la distance limite de réception. On a donc,

$$\varphi_0 = f/R = c\rho/R \text{ ou } \rho/R = \varphi_0/c = \text{constante}.$$

Donc on voit que la distance limite de réception est proportionnelle au vecteur de la courbe tracée au moyen du résonateur et déterminée par les points pour lesquels la réception cessait.

De ce qui précède, on peut conclure que le dispositif correspondant à la courbe intérieure de la figure 7 donne, en ce qui concerne la répartition du champ, des résultats au moins aussi bons que ceux obtenus avec un miroir de Hertz. Si l'on voulait réaliser un miroir correspondant au cas de la figure 7 ($\lambda = 120$ mètres), ce miroir, consistant en fils placés côte à côte, devrait avoir 30 mètres de hauteur, 340 mètres de longueur, et environ 120 mètres de profondeur, avec une ouverture de 240 mètres. Le dispositif de la figure 7, comprenant quatre fils aériens placés aux sommets d'un rectangle de 60×30 mètres, donne des résultats au moins aussi bons et possède l'avantage que la direction du champ maximum peut subir une rotation de 180°, ou de 90° si l'on modifie les phases.

Il restait à déterminer quels sont les résultats de ces expériences que l'on ne peut pas obtenir par le simple emploi de *trois fils transmetteurs agissant comme réflecteurs*. Comme cela a été dit plus haut, ces trois fils étaient disposés suivant une parabole dont la distance locale était d'environ 3 mètres. Un fil simple était placé à proximité de ce foyer et agissait comme source de radiation. Les autres fils, après avoir été accordés sur le fil placé au foyer, agissaient comme réflecteurs. Comme contrôle, on désaccordait les fils pendant une partie de l'expérience, et l'on modifiait aussi la position du fil transmetteur. Les résultats observés sont indiqués dans le tableau V. Dans les expériences 1 à 4, le fil transmetteur S était à égales distances de S_2 et S_3 et à une distance d de S_1. Dans les expériences 5 à 8, S était à même distance de S_1 et S_2 et à une

distance d_1 de S_3 ($d_1 = 9$ mètres environ). Les lectures au bolomètre, considérées comme proportionnelles au carré de l'intensité de champ, sont indiquées sous la rubrique E^2 dans le tableau. Le point d'observation E_1 avait pour azimut $\alpha = 0$ et était situé à 1 300 mètres environ.

TABLEAU V

d	6 m.	8 m.	10 m.	REMARQUES
E^2	3,2	3,0	2,9	Les fils S_1 S_2 S_3 non accordés.
E^2	3,1	2,8	2,7	Tous les fils en résonance.
E^2	3,7	»	3,1	S_1 non accordé. S_2 et S_3 en résonance.
E^2	2,7	»	2,5	S_1 en résonance. S_2 et S_3 non accordés
$d_1 = 9$ m.				
$E^2 = 2,2$. . .				Tous les fils non accordés.
$E^2 = 1,9$; 2,7. .				Tous les fils accordés.
$E^2 = 2,3$. . .				S_2 et S_3 accordés. S_1 non accordé.
$E^2 = 2,4$. . .				S_1 accordé. S_2 et S_3 non accordés.

Les expériences montrent que l'emploi d'un miroir ainsi constitué peut rendre des services en pratique. Sans doute, il faudrait adopter une longueur totale égale à $\lambda/4$. Autant que l'on peut en juger par les faibles valeurs observées, la différence entre les résultats obtenus avec des fils accordés et avec des fils non accordés est très faible.

L'auteur termine en indiquant qu'au poste récepteur on peut recevoir les ondes venant d'une direction déterminée en employant une antenne presque horizontale située dans le plan vertical qui passe par le transmetteur.

R. V.

ÉCLAIRAGE

Sur les lampes à magnétite. — **Fleming.** — *Electrical World.*

Un certain nombre de ces lampes [1] est employé en Amérique pour l'éclairage des rues; elles fonctionnent sous 110 ou 220 volts. Actuellement, les électrodes sont constituées par un mélange de magnétite et de sels de chrome et de titane. Le mélange est pressé et introduit dans des tubes en fer de 26 centimètres de longueur et 16 millimètres de diamètre. L'arc est très stable. L'électrode supérieure ne s'use pas. La durée de fonctionnement atteint 150 à 200 heures. La consommation spécifique s'élève seulement à 0,5 watt par bougie. Les lampes ne fonctionnent que sur courant continu et pas sur courant alternatif.

E. B.

[1] Décrites dans *l'Éclairage Électrique*, tome XL, 24 sept. 1904, page CL.

Sur la consommation et l'intensité lumineuse des lampes Edison. — **R. Lucas.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 31 mai 1906.

Voigt a établi que la quantité de lumière émise par des lampes à incandescence est à peu près exactement proportionnelle à la troisième puissance de la quantité d'énergie consommée. Heß a montré plus tard que, dès que l'on considère des intervalles assez importants, la relation de Voigt doit être complétée par des termes supplémentaires. Finalement, H.-F. Weber a vérifié, par des expériences pratiques, la régle de Voigt mais a trouvé que le facteur de proportionnalité de la formule n'est pas absolument constant et croît avec l'intensité lumineuse, pour atteindre un maximum et diminuer ensuite lentement. Cet auteur a essayé aussi d'établir théoriquement cette relation, ainsi que la température vraie du filament de carbone. Les nombreuses recherches faites dans ces dernières années sur la détermination des hautes températures ont conduit au résultat certain que les relations sur la dépendance entre l'intensité de la radiation, la longueur d'ondes et la température prises par H.-F. Weber comme base du calcul ne sont pas exactes. Alors que, par exemple, les formules de Weber donnent pour la température d'un filament en fonctionnement normal la valeur 1500° absolus, la valeur réelle est sensiblement plus élevée et est voisine de 2000° absolus.

L'auteur indique que la formule empirique de Voigt peut être déduite des lois de la radiation. Cette déduction n'est d'ailleurs valable en toute rigueur que pour un corps complètement absorbant, c'est-à-dire pour un corps noir.

La loi de Stephan exprime que la radiation totale J d'un corps noir est directement proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue T. On a donc

$$(J_1/J_2) = (T_1/T_2)^4. \quad (1)$$

Soient, en outre, H_1 et H_2 les deux éclats photométriques d'un corps rayonnant aux températures voisines T_1 et T_2. On peut poser

$$(H_1/H_2) = (T_1/T_2)^x,$$

l'exposant x étant inversement proportionnel à la température absolue T, et le facteur de proportionnalité ayant la valeur 26150 (Rasch). On a donc :

$$H_1/H_2 = (T_1/T_2)^{26\,150/T}. \quad (2)$$

On tire des équations 1 et 2 l'équation suivante :

$$H_1/H_2 = (J_1/J_2)^{26\,150/4T}. \quad (3)$$

On doit prendre pour valeur de T la température pour laquelle le corps noir possède un éclat égal à celui de la lampe à incandescence fonctionnant normalement. Pour une lampe à filament épais, la température noire est voisine de 2040° absolus. On a donc

$$H_1/H_2 = (J_1/J_2)^{3,2}. \quad (4)$$

On trouve donc ainsi pour l'exposant une valeur voisine de celle trouvée empiriquement (formule de Voigt). Cela montre que le filament de carbone porté à l'incandescence dans un espace vide d'air est assez semblable à un corps noir. D'autre part, on voit que la règle de Voigt ne peut être valable que pour un intervalle de température déterminé. La relation entre la puissance consommée et l'intensité lumineuse, valable pour toutes les températures, ne peut être déterminée rigoureusement que pour le corps noir. Pour pouvoir établir cette relation pour le filament de charbon, il faudrait pouvoir connaître d'abord la relation entre le pouvoir de réflexion du charbon et la longueur d'ondes.

E. B.

MESURES

***Mesure du pouvoir calorifique du charbon.* — J. Holliday.** — *Electrical Review N. Y.*, 19 mai 1906.

Il existe différentes méthodes pour déterminer le pouvoir calorifique d'un combustible : cette détermination peut être faite par un calcul basé sur l'analyse chimique, par la combustion d'un petit volume de ce combustible dans un calorimètre de forme appropriée, et par la combustion d'une grande quantité (quelques tonnes) dans une chaudière d'essai.

Pour calculer le pouvoir calorifique d'un combustible d'après son analyse chimique, il faut faire d'abord une analyse extrêmement précise et très coûteuse. Ensuite, on applique une des formules données par différents physiciens, telles que celles de Dulong, Scheurer-Kestner, Cornet et Ser. Les résultats donnés par des formules ne sont pas tout à fait exacts. En 1900, le Dr Bünte a publié les résultats d'une série d'expériences faites sur la composition chimique de la plupart des charbons employés en Allemagne. Il a trouvé que les valeurs expérimentales concordaient bien avec les valeurs calculées au moyen de la formule suivante :

$$81C + 290\left(H + \frac{O}{8}\right) + 25\,S - 6W,$$

en appelant C la teneur en carbone (en %), H la teneur en hydrogène, O la teneur en oxygène, S la teneur en soufre, W la teneur en humidité. Le comité de l'American Society of Mechanical Engineers a adopté cette formule.

On admet généralement que l'essai calorimétrique donne des résultats plus exacts que le calcul basé sur l'analyse chimique. La détermination de la quantité exacte de chaleur développée dans des opérations chimiques (combinaisons du combustible étudié avec de l'eau ou de l'oxygène pur) a fait l'objet d'un grand nombre d'expériences. Les appareils les plus employés en pratique sont ceux de L. Thompson, W. Thomson et Mähler.

L'appareil de Lewis Thompson comprend un récipient en verre contenant 2 kilogrammes d'eau. Le fourneau consiste en un cylindre de cuivre fermé à une extrémité et contenant deux grammes de combustible finement pulvérisé mélangé intimement avec un composé oxygéné (trois parties de chlorate de potasse et une partie de nitrate de potasse). La température de l'eau ayant été exactement déterminée, on met le feu au mélange au moyen d'une mèche, on ferme le cylindre de cuivre au moyen d'un couvercle, on le place dans une sorte de cloche à plongeur, et l'on observe l'élévation de température de l'eau. Il faut faire des corrections à cause de la capacité calorifique du récipient de verre, du cylindre de cuivre, du thermomètre, et à cause de la combustion incomplète et des pertes par refroidissement. Ces dernières peuvent être déterminées expérimentalement, mais il n'en est pas de même des autres. L'inventeur admet comme règle que les pertes totales représentent 10 % du résultat total : ce chiffre est généralement insuffisant.

Un meilleur appareil est celui du Pr W. Thomson : l'oxygène n'est plus emprunté, comme précédemment, à des composés chimiques, mais est amené dans le calorimètre sous forme de cou-

rant gazeux. Le principe de la cloche à plongeur a été conservé. Comme précédemment, les gaz de la combustion se dégagent au-dessous des bords de la cloche à plongeur et cèdent leur chaleur à l'eau. L'auteur a modifié l'appareil de Thomson pour le rendre plus commode en pratique.

Un appareil souvent employé est la bombe calorimétrique construite par Mähler sur les principes indiqués par Berthelot. Le combustible à essayer est placé sur un plat en platine et enfermé dans une bombe d'acier dans laquelle on introduit de l'oxygène sous pression en quantité suffisante pour assurer la combustion. La bombe est placée dans un calorimètre à eau, et le combustible est allumé par une étincelle électrique. L'appareil donne de bons résultats mais n'est pas d'un emploi très commode et est coûteux.

Pour choisir l'échantillon sur lequel porte l'essai, on doit apporter une grande attention à ce que cet échantillon représente bien la valeur moyenne du combustible employé. Pour cela, on procède par fractionnements et mélanges successifs de différents échantillons pris au hasard.

R. R.

***Calorimètre à alcool pour les essais de combustibles.* — W. M. Wallace.** — *Engineering*, 20 avril.

L'auteur indique que le meilleur appareil pour l'étude des combustibles employés dans les machines à vapeur est le calorimètre : cette méthode est rapide et donne des résultats directs. En employant le calorimètre connu de Thomson, l'auteur a trouvé que, pour un même combustible, les résultats diffèrent souvent de 3 à 4 °/₀. Les gaz peuvent ne pas abandonner toute leur chaleur à l'eau ; le facteur d'étalonnage de l'appareil ne peut pas être exactement déterminé ; en outre, si l'on brûle un gramme de combustible dans 2 000 grammes d'eau, l'élévation de température est de six à sept degrés et la lecture faite sur un thermomètre gradué au dixième de degré peut donner une erreur de 2 °/₀ ; enfin les corrections dues à la radiation sont difficiles à effectuer.

L'auteur signale le calorimètre du type Carpenter, où le combustible est brûlé dans de l'oxygène dans une petite chambre entourée d'eau, dont la dilatation indique la valeur du pouvoir calorifique du combustible. L'oxygène, à une pression constante, est introduit dans une chambre de combustion, et les gaz dégagés passent lentement dans un long serpentin immergé dans l'eau. Le récipient extérieur contenant l'eau est fermé et est muni d'un long tube capillaire fixé à sa partie supérieure, dans lequel l'eau dilatée se déplace. L'appareil est étalonné au moyen d'expériences préalables faites avec différents poids de carbone pur ; une courbe indique la relation entre le pouvoir calorifique et l'élévation de l'eau dans le tube capillaire. Un inconvénient de cette méthode est que les mesures doivent être faites toutes à la même température : en outre, la dilatation de l'eau se produit d'une manière très irrégulière.

L'auteur, ayant à faire des mesures aux mines de charbon de la compagnie de Beers, à Kimberley, a songé à employer un liquide dont la dilatation soit plus uniforme que celle de l'eau. Après un certain nombre d'expériences, il a trouvé que l'alcool donne de très bons résultats : sa dilatation, dans les limites de température atteinte avec cet appareil, présente une valeur constante. En outre, la chaleur spécifique de l'alcool est de 0,7 environ, et le coefficient de dilatation a une valeur plus grande que celui de l'eau : les lectures sont donc plus exactes. Par exemple, la combustion de $0^{gr},6$ de charbon a donné dans le tube, un déplacement du niveau de 75 centimètres. En fait, l'appareil est un très grand thermomètre dans le réservoir duquel se produit la combustion du charbon. Le poids du combustible, ainsi que la mesure au calorimètre peuvent être déterminés avec une exactitude de quelques millièmes : il est seulement nécessaire de faire attention à la courbe des corrections dues à la radiation. Un autre avantage que présente l'emploi du calorimètre à alcool est la réduction de la durée de l'essai, puisqu'il suffit de brûler environ un demi-gramme de combustible. Un tube fixé à l'appareil permet de recueillir les produits de la combustion et d'en faire l'analyse.

Avec cet appareil, on peut, en une demi-heure, déterminer le pouvoir calorifique ainsi que la teneur d'un combustible en cendres, en carbone, en hydrogène et en eau.

R. R.

***Sur les voltmètres électrostatiques. Recherche expérimentale de l'influence de la durée de charge et de décharge sur les indications de l'électromètre.* — H. Fischer.** — *Physikalische Zeitschrift*, 1er juin 1906.

Quand on étudie complètement les phénomènes

en jeu dans les voltmètres électrostatiques actuellement employés, on trouve le résultat, contraire aux idées admises, que les constantes de l'électromètre ne sont pas indépendantes de la durée de charge ni de la fréquence. D'après les résultats obtenus par l'auteur dans un grand nombre d'essais et de courbes, ce n'est que dans des conditions bien déterminées que la durée de charge est sans influence sur les indications, conditions qui ne sont pas remplies dans la plupart des appareils employés en pratique.

L'étude expérimentale d'une série d'électroscopes ou d'électromètres à quadrants a donné des résultats concordant avec l'étude théorique faite par l'auteur [1] : ce n'est qu'en évitant la présence de tout diélectrique dans la construction de l'appareil ou des parties de l'appareil où il se produit des forces attractives ou répulsives sur le système mobile portant l'aiguille, que l'on peut directement passer sans corrections du courant continu au courant alternatif.

Si, par exemple, on étalonne sur courant continu l'un des électroscopes les plus couramment employés, et si l'on emploie ensuite l'appareil sur courant alternatif avec la même courbe d'étalonnage, on constate fréquemment des erreurs de mesure de 10 °/₀, et même de 50 °/₀, les indications de l'appareil étant en général plus petites pour du courant alternatif que pour du continu, pour de mêmes tensions efficaces.

De même que pour les électroscopes, l'essai d'un grand nombre d'électromètres à quadrant de différents types a montré que l'étalonnage sur courant continu ne peut pas être appliqué sur courant alternatif : les erreurs sont cependant moins considérables que pour les électroscopes. Ces erreurs sont tantôt positives tantôt négatives, suivant que l'aiguille est reliée, d'après la méthode idiostatique, à l'une ou l'autre paires de quadrants.

Il n'y a qu'un seul moyen pour éviter l'inconvénient résultant de la dépendance entre les constantes des voltmètres électrostatiques et la durée de charge ; c'est d'établir l'enveloppe entièrement en métal et de n'employer aucun isolant, sauf aux sorties des fils. Un essai fait sur un tel appareil a montré à l'auteur l'exactitude de ce qui précède : la durée de charge, ou la fréquence du courant alternatif, ne produit aucun effet dans un appareil ne contenant aucun diélectrique. Les ouvertures ou les fenêtres, par lesquelles on observe les mouvements de l'équipage mobile, ne doivent pas être fermées par des corps transparents diélectriques tels que le verre ou le quartz ; on doit employer des toiles métalliques à mailles serrées qui assurent la continuité de l'enveloppe métallique. On évite ainsi la dispersion des lignes de force électriques, qui se produit exactement comme la dispersion des lignes de force magnétiques dans les appareils magnétiques, et qui varie avec la fréquence, ou la durée de charge.

Ossanna, dans une étude théorique très complète, a établi une formule qui permet très simplement d'évaluer les relations des forces agissant sur les appareils électrostatiques. Si l'on définit la sensibilité de déviation d'un électromètre à quadrants employé avec le montage idiostatique, ou d'un voltmètre électrostatique équivalent, par l'équation $\alpha = SE^2$, α désignant l'unité de déviation, E l'unité de tension, et S le symbole de la sensibilité, on a la relation :

$$S = \frac{(dC/d\alpha)}{2D},$$

C désignant la capacité de l'appareil et D le couple mécanique. On voit que, pour que les indications soient indépendantes de la durée de charge, et pour que des champs électrostatiques extérieurs n'agissent pas sur l'appareil, il faut que la valeur de $dC/d\alpha$ soit une grandeur dépendant seulement de α : ce résultat est obtenu par la suppression de tout diélectrique et par l'emploi d'une enveloppe métallique complète entourant le système mobile.

E. B.

[1] Cette étude sera publiée prochainement.

CHARTRES — IMPRIMERIE DURAND, RUE FULBERT.

Le Gérant : J.-B. Nouet.

L'Éclairage Électrique

REVUE HEBDOMADAIRE DES TRANSFORMATIONS

Electriques — Mécaniques — Thermiques

DE

L'ÉNERGIE

CALCUL D'UN MOTEUR A RÉPULSION D'ATKINSON

L'existence, en Angleterre, de nombreux réseaux monophasés, établis primitivement en vue de la distribution d'éclairage, a conduit naturellement à une demande importante de moteurs monophasés capables de démarrer avec un couple énergique, pour la commande d'ascenseurs, de monte-charges, et l'attaque directe de pompes, certains de ces travaux nécessitant d'ailleurs un moteur réversible.

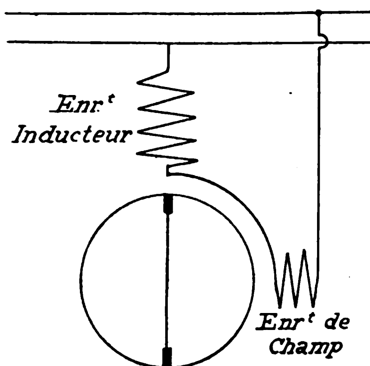


Fig. 1.

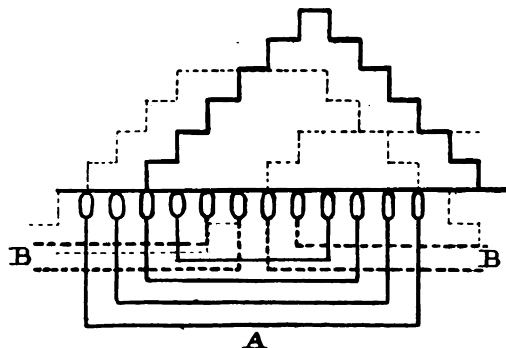


Fig. 2.

La fréquence élevée d'un grand nombre de ces réseaux créait, dès l'abord, une difficulté considérable au point de vue de la commutation. Le moteur à répulsion, grâce à l'indépendance des circuits primaire et secondaire, qui permet de maintenir, même avec des fré-

quences très élevées, la tension de réactance dans des limites convenables, paraît particulièrement indiqué dans ces cas difficiles. Mais le moteur à répulsion ordinaire n'est pas réversible ; aussi a-t-on adopté, à la *Rhodes Electrical Mg Co*, le type de moteur connu sous le nom de moteur d'*Atkinson*, et dont le schéma est représenté figure 1. Le stator de ce moteur porte deux enroulements en quadrature, un *enroulement inducteur* et un *enroulement de champ*. Le renversement du sens de rotation s'obtient en renversant l'enroulement du champ, comme l'indique la figure 2, représentant la distribution de la force magnétomotrice résultante.

Le moteur dont la description suit est destiné à démarrer seulement comme moteur à collecteur : il porte des bagues qui permettent de le faire fonctionner, lorsqu'il a atteint sa vitesse, comme un moteur d'induction ordinaire. Il a paru cependant intéressant d'en reproduire les calculs, d'autant plus qu'il s'agit, non d'un projet purement théorique, mais d'une machine effectivement construite.

Puissance normale	20 chevaux
Tension aux bornes	200 volts
Fréquence	40 périodes
Nombre de pôles	6
Dimensions du stator.	
Alésage du stator	$39^{cm},46$
Diamètre extérieur des tôles du stator	53 ,3
Nombre de canaux de ventilation	2
Longueur du stator entre flasques	$17^{cm},1$
Longueur effective du stator	15 ,27
Nombre d'entailles du stator	72
Dimension d'une entaille	3×1 cm.
Type des entailles	demi-fermées
Rapport de l'arc occupé par une dent au pas des dents	0,81
Dimensions du rotor.	
Diamètre extérieur du rotor	$39^{cm},3$
Nombre d'entailles du rotor	83
Profondeur radiale des tôles du rotor	4 cm.
Rapport de l'arc occupé par une dent au pas des dents	0,80

ÉTUDE DE L'ENROULEMENT DU STATOR.

Les caractéristiques principales de l'enroulement du stator se déterminent de la même manière que dans un moteur d'induction monophasé ordinaire. On reproduira cependant ici les calculs correspondants, afin de permettre de suivre d'un bout à l'autre l'étude d'un moteur de ce genre.

Si H désigne le nombre moyen d'encoches du stator et du rotor, par pôle $= 13$; δ la dimension de l'entrefer $= 0^{cm},08$, et l la longueur du stator $= 17^{cm},1$, on a pour le coefficient de dispersion σ, en appliquant la formule de Behn-Eschenburg modifiée pour le courant monophasé (¹).

$$\sigma = \frac{4,5}{H^2} + \frac{6\delta}{l} = \frac{4,5}{169} + \frac{6 \times 0,08}{17,1} = 0,055.$$

(¹) L'auteur a tiré grand profit, pour l'étude des moteurs monophasés, de l'ouvrage de *M. Punga*, *Single Phase Commutator Motors*, ouvrage auquel cette formule est empruntée.

On en déduit facilement :

$$\text{Facteur de puissance maximum} = \frac{1 - 2\sigma}{1 + 2\sigma} = \frac{1 - 0{,}11}{1 + 0{,}11} = 0{,}80$$

et, comme dans un moteur monophasé le courant à vide est sensiblement égal au double du courant magnétisant, on a :

$$\text{Courant magnétisant} = \text{Courant de pleine charge} \sqrt{\frac{\sigma}{2}},$$

cette dernière relation supposant que la charge normale correspond à la valeur maxima du facteur de puissance.

Le coefficient de dispersion σ est ici défini comme le rapport du courant magnétisant au courant de court-circuit ; les valeurs fournies par la formule sont en général trop faibles : d'une part les pertes dans le moteur ont tendance à relever le centre du cercle au-dessus de l'axe horizontal, et d'autre part le courant à vide est généralement un peu inférieur au double du courant normal. On tient compte de cette différence, pour des moteurs de cette puissance, en augmentant d'environ 5 % le chiffre fourni par la formule. On prendra donc

$$\cos\varphi = 0{,}85.$$

En admettant que le rendement est égal à 0,83, on a, pour le courant de pleine charge, ne intensité de

$$\frac{20 \times 746}{200 \times 0{,}85 \times 0{,}83} = 103{,}5 \text{ ampères.}$$

Le courant magnétisant est, par suite, égal à

$$103{,}5 \sqrt{\frac{0{,}055}{2}} = 17{,}2 \text{ ampères.}$$

Le nombre de tours à mettre sur chaque pôle est fourni par la formule connue :

$$\text{Ampère-tours par pôle} = 0{,}8 \times 1{,}2 \times r \times \delta \times \text{Induction moyenne dans l'entrefer.} \qquad (a)$$

Dans cette formule, le facteur 1,2 a été introduit pour tenir compte de la réluctance du circuit magnétique ; r représente le rapport de l'induction maxima à l'induction moyenne dans l'entrefer, rapport qui, dans le cas particulier, peut être pris égal à 1,4, l'enroulement étant réparti dans 4 paires d'encoches laissant en leur milieu 4 entailles disponibles.

D'autre part, on a la formule très générale

$$E = 2\pi \,.\, g \times T \,.\, N \,.\, M \,.\, 10^{-8}. \qquad (b)$$

T représentant le nombre de tours par pôle, N la fréquence, M peut représenter le flux total efficace du stator. Le facteur d'enroulement g, toujours plus faible dans un moteur monophasé, peut être pris égal à 0,83.

Si l'on désigne par I_0 le courant magnétisant et A la surface cylindrique intérieure effective du stator, la perte ohmique étant admise à 5 %, une combinaison des deux formules (a) et (b), dont il est facile de vérifier l'exactitude, donne

$$T^2 = \frac{0{,}8 \times 1{,}2 \times 0{,}08 \times 1{,}4 \times 0{,}95 \times 10^8}{2\pi \times 0{,}83} \times \frac{E}{I_0 NA}$$

ou

$$T = 1\,400 \sqrt{\frac{E}{I_0 NA}} = 1\,400 \sqrt{\frac{200}{17{,}2 \times 40 \times 1\,520}} = 19.$$

Ce chiffre représente le nombre total de tours par pôle, c'est-à-dire la résultante du nombre de tours de l'enroulement inducteur et de l'enroulement de champ. On admettra que l'enroulement inducteur comporte 18 tours par pôle et l'enroulement de champ un nombre de tours dépendant du couple que l'on désire obtenir.

Il est maintenant facile de calculer l'induction et le flux.

Induction maxima dans l'entrefer..	4 250
Induction moyenne dans l'entrefer.	3 000

$$\text{Flux par pôle } \frac{190 \times 10^8}{2\pi \times 40 \times 0{,}83 \times 6 \times 17} = 0{,}8 \times 10^6.$$

Induction moyenne dans les dents du stator.	6 500
Induction moyenne dans la couronne du stator.	5 100

Pour la commodité de l'enroulement, on prendra 3 fils en parallèle, d'un diamètre de $3^{mm},65$ nu, au lieu d'un fil unique, aux dépens, il est vrai, du facteur d'utilisation.

Calcul du couple de démarrage.

Il faut maintenant examiner quelles sont les meilleures proportions relatives à donner à l'enroulement inducteur et à l'enroulement de champ pour obtenir au démarrage un couple maximum, la résultante, ou la racine carrée de la somme des carrés, restant sensiblement égale à 19, puisque les deux enroulements sont montés d'une manière permanente en série.

La définition de σ comme rapport du courant magnétisant au courant de court-circuit, c'est-à-dire au courant absorbé par le moteur calé lorsque les balais sont en court-circuit, sous le pôle, s'exprime par la relation

$$\sigma = \frac{\frac{e_0}{z}}{\frac{e_0}{z'}} \qquad \text{ou} \qquad z' = \sigma z.$$

z représentant l'impédance de l'enroulement du stator, le secondaire étant ouvert, et z' l'impédance lorsque les balais sont en court-circuit, e_0 désignant la tension appliquée aux bornes.

On voit donc que l'impédance de cet enroulement est réduite dans le rapport de 1 à σ par la mise en court-circuit du rotor. En d'autres termes, si un courant déterminé y circule la tension correspondante est aussi réduite dans le rapport de $1 : \sigma$ ainsi que le flux et les ampère-tours nécessaires pour produire cette tension. Le reste des ampère-tours du stator, soit $(1 - \sigma)$ fois le total, doit donc tenir en équilibre les ampère-tours du rotor, ce qui revient à dire que ceux-ci sont égaux à $(1 - \sigma)$ fois ceux du stator.

En admettant 18 tours pour l'enroulement inducteur, on peut employer jusqu'à 6 tours pour l'enroulement de champ sans que la résultante dépasse 19. On va calculer ici le couple correspondant à 3 tours par pôle pour l'enroulement de champ.

Dans tout ce qui va suivre, on néglige la résistance ohmique. Dans ces conditions l'impédance de l'enroulement inducteur est égale à

$$z = \frac{2\pi \times 40 \times 18^2 \times 1\,520 \times 10^{-8}}{0{,}077} = 16 \text{ ohms},$$

et, lorsque le rotor est en court-circuit

$$z' = 0{,}055 \times 16 = 0{,}88 \text{ ohm}.$$

$$\text{Impédance de l'enroulement du champ (3 tours par pôle)} = 16 \times \frac{3^2}{18^2} = 0{,}45 \text{ ohm}.$$

Impédance totale..	1,33 ohm
Courant de démarrage.	150 ampères

Le couple de démarrage s'obtient par la formule :

0,0324 ($1 - \sigma$). Ampères-tours de l'enroulement inducteur $\times$ Flux du champ total $\times 10^{-8}$

qui donne, dans le cas particulier :

$$43{,}8 \text{ kgm.},$$

le couple normal étant de 15 kilogrammètres.

Le tableau ci-dessous contient le résumé des calculs analogues pour le cas où l'enroulement de champ comporte de 1 à 6 tours ; on y a joint la tension de commutation par spire du rotor, qui n'est autre que la tension induite dans cette spire par le flux de champ.

NOMBRE DE SPIRES de L'ENROULEMENT DE CHAMP	COURANT DE DÉMARRAGE	FLUX DE CHAMP PAR PÔLE au démarrage.	COUPLE DE DÉMARRAGE	TENSION DE COMMUTATION au démarrage.
	amp.	CGS	kgm.	volts.
1	215	700 000	29,8	1,75
2	186	1 215 000	44,6	3,06
3	150	1 470 000	43,5	3,67
4	120	1 570 000	37,2	3,93
5	94	1 535 000	28,4	3,83
6	72	1 450 000	20,6	3,57

Ce tableau permet de constater que si l'on ne recherche que le couple maximum, la disposition d'un enroulement de champ comportant 2 tours par pôle est à choisir ; mais comme l'intensité du courant absorbé constitue un facteur nullement négligeable, il sera souvent préférable, et c'est ce qu'on admettra pour la suite du calcul, d'adopter 4 tours, malgré la diminution du couple et l'accroissement de la tension de commutation, cette valeur élevée, il convient de le rappeler, n'existant qu'à l'instant même du démarrage.

Il a paru intéressant, à titre de comparaison, de donner ici un tableau contenant les grandeurs analogues, relatives à un moteur de même puissance à 50 périodes, pour lequel on utilise les mêmes tôles et la même carcasse. Le nombre de tours par pôle de l'enroulement inducteur est, dans ce cas, de 16 au lieu de 18, et la réduction correspondante de l'impédance, insuffisamment compensée par la fréquence plus grande, a pour résultat d'augmenter le flux de champ, et par suite la tension de réactance. Aussi serait-il préférable d'établir l'enroulement inducteur avec 17 tours, qui correspondent au nombre exigé pour le fonctionnement en moteur d'induction, au risque de dépasser légèrement, lorsqu'on tient compte de l'enroulement de champ, le nombre de tours résultant le plus favorable.

NOMBRE DE SPIRES de L'ENROULEMENT DE CHAMP	COURANT DE DÉMARRAGE	FLUX DE CHAMP PAR PÔLE au démarrage.	COUPLE DE DÉMARRAGE	TENSION DE COMMUTATION au démarrage.
	amp.	CGS	kgm.	volts.
1	203	665 000	23,7	2,07
2	170	1 105 000	33,0	3,45
3	135	1 320 000	31,5	4,1
4	106,5	1 390 000	26,0	4,4
5	80	1 310 000	18,5	4,1
6	63,5	1 280 000	14,2	3,97

Il est facile de voir qu'en augmentant ou diminuant le poids du fer dans un moteur donné, on peut arriver, dans certaines limites, à obtenir pour le rapport entre le couple et le courant de démarrage telle valeur que l'on désire. Une réduction de la réluctance du circuit magnétique a en effet pour conséquence, pour un nombre d'ampère-tours donnés, un accroissement du flux et, par suite, du couple. Il est vrai qu'un flux par ampère-tour plus intense correspond à une augmentation de l'impédance ; aussi est-on souvent amené à diminuer le nombre de spires, et par suite le poids de cuivre, pour pouvoir obtenir un courant suffisamment intense. Mais comme l'impédance d'une bobine varie avec le carré du nombre de spires, le résultat final est encore un accroissement du flux et du couple par ampère-tour.

On verra, lorsqu'il s'agira d'examiner la question de la commutation, que ces conditions sont précisément opposées à celles qu'une bonne commutation suppose, c'est-à-dire un flux relativement faible et un poids de cuivre plutôt élevé. Le point le plus difficile dans l'étude de ces machines, surtout pour les fréquences élevées, et quand il s'agit d'obtenir, sans absorber un courant trop intense, un couple très énergique, est précisément de concilier ces exigences opposées. On demande parfois des moteurs fournissant au démarrage un couple double du couple normal, sans absorber plus d'une fois et demie le courant normal ; c'est là un problème très délicat, et le poids de fer nécessaire pour satisfaire à des conditions aussi rigoureuses conduit à des moteurs qui, au point de vue du poids spécifique, ne sont guère avantageux.

La pratique a montré à l'auteur que le couple réellement obtenu est d'ordinaire d'environ 10 °/₀ inférieur à celui que fournit le calcul. Cette différence s'explique, d'une part par la saturation du fer du circuit magnétique (dans le moteur étudié, cette saturation reste très modérée) et d'autre part à l'action des bobines court-circuitées sous le balais. Cette dernière influence, la plus importante dans beaucoup de cas, sera étudiée lorsque les dimensions du collecteur et des balais auront été fixées.

Étude du rotor.

Le rotor d'un moteur d'induction monophasé est le siège de deux courants, qui sont en quadrature dans l'espace, et approximativement en phase dans le temps ; le courant d'armature ou courant de charge, produit des ampère-tours équilibrant ceux du stator, déduction faite des ampère-tours magnétisants ; l'autre courant sert à l'excitation du flux transversal et produit un nombre d'ampère-tours sensiblement égal aux ampère-tours magnétisants du stator.

Courant magnétisant du stator	17,2	ampères
Courant de charge du stator	93,0	—
Rapport de transformation	1,33	—
Courant magnétisant du rotor	26,6	—
Courant de charge du rotor	124	—

Une simple réflexion fait voir qu'il est indifférent de considérer ces deux courants séparément, ou leur résultante $\sqrt{124^2 + 26{,}6^2} = 127$ ampères. On voit ainsi que l'influence du courant magnétisant est peu importante, et que l'on peut admettre sans erreur sensible que les ampère-tours du rotor sont égaux à ceux du stator.

On adoptera pour le rotor un enroulement-série, à barres, avec un tour par lamelle, et deux lamelles par encoche, ce qui conduit à un total de 162 lamelles au collecteur.

L'enroulement-série présente, pour ce type de moteurs, plusieurs avantages importants. Il permet surtout d'éviter les courants d'échange, qui, avec les petits entrefers en usage,

ont tendance à devenir très intenses et gênants lorsqu'on fait usage d'enroulements parallèle. En second lieu, l'étude du rotor est largement facilitée par la nécessité de n'avoir pas plus d'un tour par section, ce qui d'ordinaire conduit à l'emploi de barres. Il en résulte que le nombre total de tours sur le rotor se trouve limité par le nombre de soudures qu'il est possible d'exécuter à la périphérie du rotor, nombre au-dessous duquel il sera d'ailleurs souvent avantageux de se tenir. On peut donc le considérer comme une quantité plus ou moins fixée à l'avance. Aussi, dans un moteur à $2n$ pôles, on aura avec un enroulement parallèle un courant n fois plus intense qu'avec un enroulement-série, c'est-à-dire un collecteur et des balais plus coûteux ; en outre l'enroulement parallèle exagère un des inconvénients de ce type de moteur, où une basse tension est préférable pour le collecteur, et une tension élevée, plus avantageuse pour les bagues. Au point de vue de la commutation, les résultats donnés par les deux types d'enroulement sont sensiblement équivalents.

Densité de courant admise.	3,1 amp. / mm. q.
Dimensions du conducteur.	1,02 × 0,204 cm.
Épaisseur de l'isolation.	0cm,025
Épaisseur de l'isolation de l'encoche.	0 150
Largeur minima nécessaire de l'encoche.	0 583
Largeur choisie.	0 635
Profondeur de l'encoche.	2 75

Collecteur.

Diamètre du collecteur..	25cm,4
Nombre de lamelles..	162
Largeur d'une lamelle avec l'isolant.	0cm,492
Largeur d'une lamelle seule.	0 413
Longueur utile du collecteur.	9 5

(Une barre sur deux est isolée.)

La valeur relativement élevée de la tension de commutation au démarrage conduit à l'adoption de balais couvrant au plus 1,5 à 2 lamelles.

Dimensions d'un balai.	2,54 × 0,81 cm.
Nombre de balais par ligne.	3
Nombre de lignes de balais.	6
Densité de courant.	6,7 amp. / cm. q.

Cette densité serait plutôt élevée si le collecteur devait travailler d'une façon continue ; mais, on s'en souvient, son rôle est limité à la période de démarrage, ce qui fait que, en réalité, cette densité de courant est fort basse. Il n'y a pas d'inconvénient, dans ces conditions, à admettre une densité de courant atteignant 15 à 20 ampère-centimètre carré, et dans le cas particulier, on aurait pu se contenter de monter deux balais par tourillon.

Diamètre des bagues.	16cm,5
Largeur d'une bague.	5 cm.
Courant par bague : environ.	70 ampères
1 balai par bague.	(Morganite 2) (1)
Dimensions des balais.	4,44 × 2,54 cm.
Densité de courant : environ.	6,2 amp. / cm. q.

(1) Ces balais se comportent parfaitement au point de vue électrique ; ils présentent, par contre, le grave inconvénient, en raison de leur peu de dureté, de s'user très rapidement.

Commutation.

On a donné plus haut les valeurs de la tension de commutation au démarrage, qui n'est autre, à ce moment, que la tension induite dans une spire par le flux de champ. Comme on l'a vu, cette tension reste dans des limites convenables.

M. *Punga* a démontré qu'en négligeant la réaction due aux bobines court-circuitées par les balais, la tension de commutation, dans un moteur à répulsion est maxima au démarrage ; ainsi l'apparition d'étincelles pendant la période d'accélération n'est pas à redouter. Tant que le moteur fonctionne en moteur d'induction, comme le champ tourne sensiblement en synchronisme avec le rotor, la tension de commutation reste à peu près égale à la tension de réactance, elle-même très faible, puisque la plus grande partie du courant passe par les bagues. On n'a donc à se préoccuper, dans ces conditions, que de la commutation au moment du démarrage, et, en marche normale, les pertes au collecteur se réduisent au travail de frottement des balais.

Il peut arriver pourtant, si la tension de commutation d'un moteur, et par suite la réaction des bobines court-circuitées sur le champ sont excessives, que cette tension de commutation ait un maximum pour une vitesse différente de zéro. Cet effet s'est produit, d'une façon très marquée, dans une série de moteurs de 20 chevaux à 100 périodes construits par la *Rhodes Electrical* C°. Il est pourtant possible de construire des moteurs de 5 à 7,5 chevaux, à 100 périodes, capables de démarrer avec un couple triple ou quadruple du couple normal, et de prendre leur vitesse, le tout avec une commutation parfaite, sans qu'il soit nécessaire de donner aux connexions du collecteur une grande résistance. Par contre, à moins de prendre des précautions toutes spéciales, il n'est pas possible d'établir dans les mêmes conditions des moteurs de 20 chevaux. On peut obtenir au démarrage, les 2/3 ou les 3/4 du couple normal, quelquefois davantage, en décalant les balais dans le voisinage du pôle, de manière à affaiblir le champ traversant la bobine soumise à la commutation, malgré la valeur élevée des ampère-tours du rotor. Mais si le calage est défectueux, on observe ce qui suit. Le moteur démarre, avec une accélération plutôt faible, et presque sans étincelles ; lorsque la vitesse augmente, l'accélération croît aussi, d'ordinaire brusquement, et les étincelles apparaissent, pour devenir de plus en plus violentes, jusqu'à une vitesse inférieure au synchronisme, où elles cessent subitement. Au voisinage du synchronisme, la commutation d'un moteur à répulsion à 100 périodes est, quelle que soit sa puissance, aussi parfaite que celle d'une machine à courant continu.

Les effets dont il vient d'être question sont dus entièrement à la réaction des bobines court-circuitées qui vient affaiblir le champ ; cette réaction est très marquée dans un moteur à répulsion à 100 périodes où le champ est relativement faible. Il est intéressant d'examiner quelle peut-être son influence dans le cas du moteur étudié.

M. Punga a donné (¹), pour l'expression de la force magnétomotrice d'une bobine soumise à la commutation, la formule suivante :

$$0{,}083\, n^2 z \frac{E_f}{w},$$

où n représente le nombre de lamelles recouvertes par un balai.

z le nombre de spires entre 2 lamelles.

E_f la tension de commutation.

w la résistance de contact pour une rangée de balais.

(¹) Single phase Commutator Motors, p. 46.

En admettant, ce qui n'est d'ailleurs qu'une hypothèse, $w_o = 0,18$ ohm-centimètre carré pour la densité de courant de 7 ampères-centimètre carré, on a, pour la résistance d'une ligne de balai

$$w = 0,029 \text{ ohm}.$$

Les ampère-tours engendrés par la bobine court-circuitée sont donc égaux à

$$0,083 \times 2,25 \times \frac{3,93}{0,029} = 25,2$$

ce qui est négligeable par rapport aux ampère-tours de champ.

$$4 \times 120 = 480.$$

Rendement.

Pertes dans le cuivre du stator.

Longueur moyenne d'un tour : environ	915 cm.
Nombre total des tours	132
Résistance totale	0,0647 ohm.
Pertes par effet Joule	647 watts.

Pertes dans le cuivre du rotor

Longueur d'une barre	35 cm.
Section	0,206 cm. q.
Résistance d'une barre	265×10^{-6} ohms.
Nombre total de barres	324
Courant par barre	64 ampères.
Pertes par effet Joule	350 watts.

Pertes dans le fer du stator.

Volume du fer du stator	12 650 cm. c.
Poids	103 kg.
Pertes en watts par kg	4,5
Pertes totales	465 watts.

Pertes dans les dents.

Volume d'une dent	38 cm. c.
Poids d'une dent	0,29 kg.
Poids total des dents	20,75 kg.
Pertes en watts par kg	6,25
Pertes totales	130 watts.

Pertes dans le fer du rotor.

Les pertes dans le fer du rotor sont très réduites, eu égard à la faible fréquence.

En prenant 10 % des pertes dans le fer du stator, soit 60 watts, on a une sécurité très suffisante.

Frottement des balais.

En admettant une pression de 150 gr.-centimètre carré et un coefficient de frottement de 0,3, la surface totale de contact des balais étant de 37 centimètres carrés, le travail de frottement correspond à 216 watts.

Bagues. — En l'absence de mesures précises sur la résistance de contact ou le coefficient de frottement des balais tendres employés, qui sont l'un et l'autre plutôt faibles, on admettra 200 watts pour la somme des pertes correspondantes.

Les pertes mécaniques, dues aux frottements dans les paliers, et à la ventilation du moteur, sont en général d'environ 2 1/2 % de la puissance totale, ici 400 watts.

On a donc :	Pertes dans le fer du stator.	595 watts.
	— — rotor.	60 —
	— cuivre du stator.	647 —
	— — rotor..	350 —
	Pertes au collecteur.	216 —
	— aux bagues.	200 —
	— mécaniques.	400 —
	Pertes totales.	2 468 watts
	Puissance utile.	14 900
	— absorbée..	17 368
	Rendement.	0,86

F. Creedy.

NOTE SUR LES LAMPES A ARC DIFFÉRENTIELLES A COURANT CONTINU ET LEURS PRINCIPAUX MONTAGES *(fin)* (¹).

Marche par deux.

Le plus grand nombre de lampes en série placées jusqu'à présent sur les réseaux de 110 à 120 volts sont des lampes par 2. Elles fonctionnent en général sous 38-42 volts aux bornes avec un rhéostat absorbant par conséquent 44-36 volts et occasionnant de ce fait une perte d'un tiers environ de la puissance totale fournie. Un certain nombre d'expériences ont montré que pour un ampérage donné le rendement lumineux d'un arc est maximum entre 40 et 50 volts suivant la nature des charbons employés. Des expériences effectuées au Laboratoire central d'électricité ont donné les résultats suivants :

Arcs a 40 volts			Arcs a 50 volts		
Intensité de courant	Intensité lumineuse	Énergie puissancique	Intensité de courant	Intensité lumineuse	Énergie puissancique
8 ampères.	320 bougies.	1 watt par bougie.	5,5 ampères.	310 bougies.	0,88 watts par bougie.
10,1 —	542 —	0,74 —	7 —	480 —	0,72 —
15 —	835 —	0,71 —	10 —	660 —	0,76 —
25 —	1 430 —	0,69 —	15,1 —	1 130 —	0,66 —

On voit donc que, surtout aux faibles intensités, l'arc à 50 volts est avantageux. Mais surtout le rendement global de la lampe augmente. Avec des sources de 110 volts, 100 volts sont utilisés, tandis que dans les lampes à 40 volts il n'y en avait que 80. Il suffit d'un rhéostat absorbant 10 volts au lieu de 30. Par suite à la même intensité nous avons au moins de ce fait 20 °/₀ de gain dans l'éclairement ou réciproquement à égalité d'éclairement on économise

(¹) Voir *Éclairage Électrique*, tome XLVIII, 7 juillet 1906, p. 18.

* La question de savoir s'il était possible ou non de supprimer les rhéostats fait depuis longtemps l'objet de très nombreuses recherches. La distinction précédente, imposée par l'expérience, nous semble devoir fixer suffisamment les idées sur ce sujet.

20 °/₀ de courant. La section des câbles peut être réduite dans le même rapport, d'où une moindre dépense d'installation.

Si l'on ajoute qu'avec des charbons spéciaux : mèche en haut au positif et homogène en bas au négatif, on obtient une lumière très belle et très fixe, on comprendra que cet arc encore peu connu soit appelé à remplacer à bref délai dans le montage par 2 les anciens arcs de 40 volts.

Echelle 0-15 ampères.

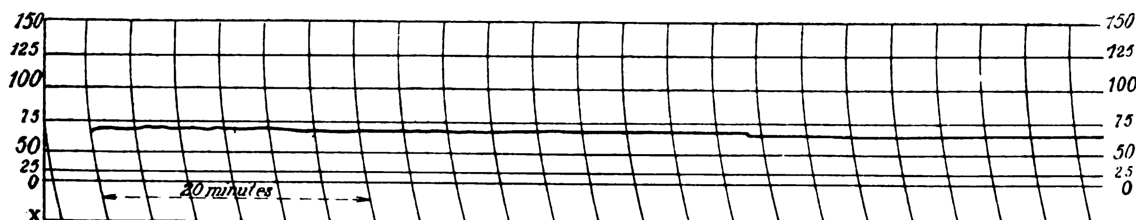


Fig. 2. — Courbe d'intensité de lampes par deux sous 110 volts (50 volts aux bornes).

Toutefois nous avons déjà indiqué qu'on ne saurait installer ces arcs sans rhéostat sur un réseau à 100 volts. Dans ces conditions nous avons constaté expérimentalement qu'au début de la mise en service, tant que la résistance des charbons n'est pas négligeable, la marche est régulière. Puis à mesure que les crayons s'usent, l'intensité augmente et devient indéterminée. Les irrégularités de l'une des lampes se font violemment sentir sur la voisine et occasionnent des pompages fréquents. Sous 110 volts au contraire, le rhéostat qui n'absorbe que 10 volts amortit considérablement les oscillations qui deviennent inappréciables et permet de comparer avantageusement, au point de vue de la stabilité, ces arcs avec ceux fonctionnant au voisinage de 40 volts aux bornes.

Marche par trois.

Ces arcs fonctionnent sous 110-120 volts avec 36-40 volts aux bornes sans rhéostat. La tension aux pointes des charbons étant plus basse que dans le système précédent on est amené à employer des crayons à mèche plus forte pour le positif. D'après la loi de M. Blondel, on augmentera l'intensité lumineuse en diminuant le diamètre des charbons, sans toutefois descendre au-dessous d'une densité de courant limite compatible avec un bon fonctionnement et une durée imposée. L'arc est moins nourri que le précédent. Aussi souffre-t-il davantage des perturbations du milieu ambiant. Il y a lieu de faire ici un choix judicieux de charbons et de ne pas employer, comme on le fait trop souvent, les premiers charbons qui tombent sous la main. C'est une tendance assez générale des consommateurs contre laquelle nous ne saurions trop les mettre en garde. Il arrivera souvent en effet que, si le voltage vient à baisser momentanément, le crayon inférieur forme à sa pointe un champignon qui se creuse une cavité dans la mèche du charbon supérieur et amène la destruction de celle-ci sur plusieurs millimètres. Les charbons ne présentant plus que des parties homogènes donnent lieu pendant un certain temps à une marche mauvaise, à pompages fréquents, qui entraînent des parties de la mèche restante si bien que parfois il faut mettre au rebut la paire de charbons mauvaise, ou du moins en retailler les extrémités. En somme ces charbons n'ont pas d'élasticité de marche, condition nécessaire puisqu'il ne faut pas que, par suite d'une modification quelconque du régime d'une unité, les autres lampes du groupe souffrent trop de la variation de voltage qui se produit forcément. A une bonne lampe il faut de bons charbons. Un montage déterminé donnera d'excellents résultats avec des charbons appro-

priés et de très mauvais avec des charbons de qualité inférieure ou faits pour d'autres services. La courbe (fig. 4) se rapporte à ce dernier cas. Tandis que celle obtenue (fig. 3) avec

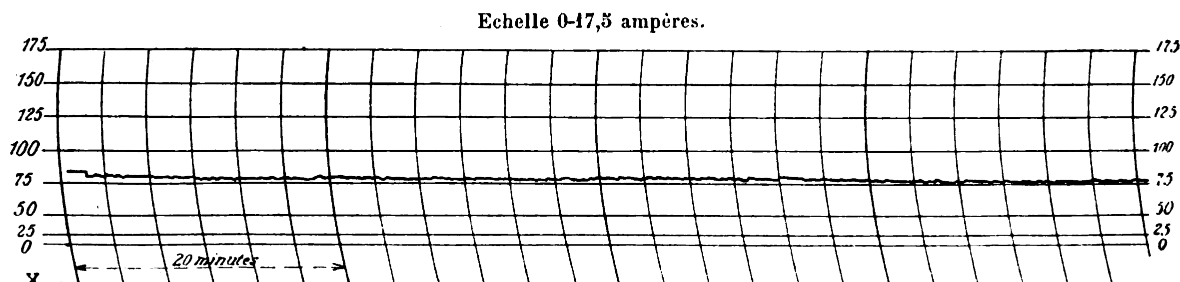


Fig. 3. — Courbe d'intensité de lampes par trois sous 110 volts sans rhéostat.

de bons charbons ne présente que des sinuosités insignifiantes celle-ci est très ondulée et on y remarque plusieurs pompages donnant lieu à des variations de 2 à 3 ampères. Dans les

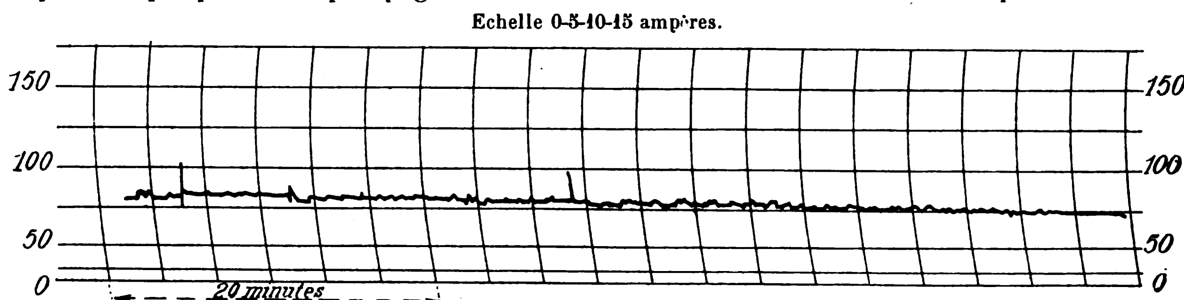


Fig. 4. — Courbe d'intensité de lampes par trois sous 110 volts sans rhéostat (charbons de qualité inférieure).

conditions les plus favorables la marche par 3 devient très intéressante, puisque pour la même consommation d'énergie, on a un foyer lumineux de plus que dans la marche classique par deux.

Marche par quatre.

L'idée de la marche par quatre est toute récente. Appelés presqu'à son apparition à étudier la question, nous avons rencontré de graves inconvénients dans l'emploi des charbons de grande conductibilité et de constitution spéciale qui sont indispensables. En raison du voltage très réduit de la lampe il y a lieu d'employer des charbons à mèche très minéralisée. Dans de certaines marques la mèche occupe les 4/5 du crayon. Il se produit non pas un arc, mais une flamme très éclairante. On a constaté des rendements de 1,5 à 2,07 bougies par watt, rendements doubles environ de ceux de l'arc ordinaire. Malheureusement il se produit d'abondantes fumées blanches dues à la présence des fluorures, silicates, etc., qui encrasseraient rapidement le mécanisme sans l'emploi d'une coupelle qui les arrête tout en servant de réflecteur. En effet il n'y a pas à proprement parler de cratère et de cône; les deux crayons se taillent à peu près de la même façon. Les matières minéralisées ne se volatilisant pas complètement dans l'arc fondaient en produisant aux extrémités des crayons des scories vitreuses constituant un véritable écran opaque pour les rayons lumineux. Certains constructeurs ont pensé à inverser les pôles, c'est-à-dire à mettre le positif en bas étant donné que c'est le charbon le plus minéralisé et qu'on devrait diminuer ainsi par l'action de la pesanteur le transport de ces scories du positif sur le négatif qui en produit peu. Ce dispositif non seulement n'empêche pas, mais encore augmente l'écran formé à la pointe du

charbon inférieur. Les gouttelettes de scorie fondue tombaient souvent dans les globes qu'elles cassent si on ne prend des précautions spéciales. Enfin à l'arrêt les charbons venant au contact, il arrivait que les scories se soudant empêchaient le réallumage.

Echelle 0-10 ampères.

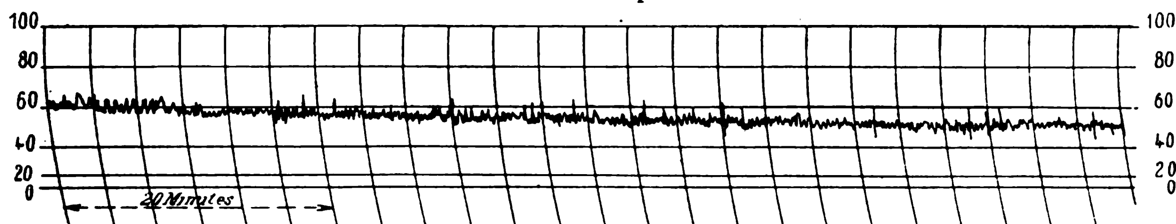


Fig. 5. — Courbe d'intensité de lampes par quatre sous 110 volts sans rhéostat.

Le plus grand inconvénient provenant de la formation de gouttelettes vitreuses il y avait lieu de chercher les moyens propres à s'en débarrasser. Nous ne parlerons pas des systèmes ingénieux réalisant l'enlèvement mécanique de la scorie. La complication des organes ne saurait être en aucun cas une garantie de bon fonctionnement et la seule modification à apporter ne pouvait que résider dans la constitution des charbons. Aussi quelques fabricants sont-ils arrivés à introduire dans leurs mèches un fondant tel que les scories tombent

Echelle 0-10 ampères.

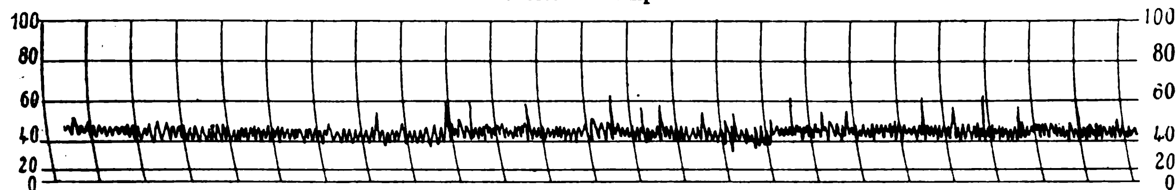


Fig. 6. — Courbe d'intensité de lampes par quatre sous 110 volts sans rhéostat (charbons de qualité inférieure).

en une pluie fine, et qu'ainsi bon nombre d'inconvénients signalés plus haut sont évités. Cette pluie n'est d'ailleurs nullement gênante. Aussi avec de tels charbons, les lampes par quatre présentent un grand intérêt. On ne peut leur reprocher actuellement que les défauts suivants : production de lumière colorée (ce qui n'est une infériorité qu'aux yeux de quelques consommateurs) — nettoyages fréquents de la lampe rendus nécessaires par les fumées de l'arc (des dispositifs de protection peuvent être avantageusement employés pour diminuer leur effet) — légères oscillations de l'intensité dues aux variations de l'écart entre les pointes, variations provenant de la chute de la petite masse minérale qui servait de foyer à l'arc. Par contre avec la même dépense d'énergie, on obtient un foyer lumineux de plus qu'avec le montage précédent, et grâce à l'excellent rendement des arcs à flamme, une lampe par quatre produit un éclairement supérieur d'au moins un quart à celui d'une lampe par trois de même intensité.

En présence de ces remarquables résultats donnés par ces charbons spéciaux, nous avons essayé de les utiliser dans des lampes par trois sous 110 volts. On obtient un rendement encore meilleur avec 36 volts aux bornes qu'avec 27 ; mais, pratiquement, de graves inconvénients se présentent. L'écart entre les charbons devient très grand, au point d'atteindre 10 centimètres à l'allumage. Le réflecteur risquerait fort d'être fondu ; placé plus haut, il ne protège plus le mécanisme des fumées. Le moindre courant d'air souffle la flamme et rend la lumière insupportable. La nécessité de protéger la flamme par un tube de verre et d'introduire des dispositifs spéciaux dans la lampe, la nature de la lumière elle-même font que les avantages de cette marche ne semblent pas encore bien établis.

Conclusion.

Malgré les quelques inconvénients que nous avons signalés, les arcs par 4 sous 110 volts semblent nettement indiqués dans le cas où de légères variations d'intensité lumineuse ne sont pas gênantes. On les emploie avec succès pour les étalages de grands magasins, éclairage des cours, halls, ateliers de grosse et moyenne mécanique, etc. Avec un rendement très grand, ils présentent l'avantage de donner pour un même circuit 4 foyers lumineux au lieu de 2 ou 3 et d'assurer ainsi une meilleure répartition de la lumière.

Pour des éclairages demandant une fixité plus grande : intérieur d'ateliers de petite mécanique ou de magasins ou enfin pour les consommateurs qui veulent de la lumière blanche, la lampe par 3 s'impose. Enfin si l'on désire une fixité absolue même au prix d'une légère perte d'énergie, il sera avantageux d'employer les lampes par 2 avec un rhéostat en série qui atténuera en majeure partie les variations d'intensité dues soit à des variations de voltage du réseau, soit à une marche un peu brusque de la lampe.

Il y aura lieu d'utiliser dans ce cas les arcs à 50 volts de préférence à ceux employés encore généralement. Avec des charbons spéciaux l'arc offre un rendement supérieur. Le rendement global de la série y gagne encore davantage puisqu'il n'y a dans le rhéostat qu'une perte d'énergie correspondant à une chute de tension de 10 à 20 volts. Nous avons vu qu'on pouvait évaluer à 20 °/₀ l'économie ainsi réalisée.

Au point de vue des intensités de courant à adopter dans les arcs, c'est dans chaque cas une question d'espèce. L'éclairement augmente avec l'intensité, mais l'expérience a montré que tant pour la stabilité que pour la durée il n'était pas avantageux de dépasser 15 ampères lorsqu'il s'agit d'arcs destinés à l'éclairage public ou privé mais non à des usages spéciaux tels que projecteurs, etc. On a d'ailleurs obtenu pour cette limite (arc de 12 ampères) avec des charbons à flamme, il est vrai, des intensités lumineuses considérables allant jusqu'à 1 500 bougies qui représentent par conséquent des foyers lumineux plus que suffisants dans la pratique. Toutefois pour ces arcs à flamme il est peut-être préférable de se tenir entre 5 et 10 ampères, intensités limites qui nous ont semblé les plus favorables à leur bon fonctionnement.

Série d'un plus grand nombre d'arcs.

Dans l'état actuel de la fabrication des charbons il ne saurait être question de marcher à feu nu par plus de 4 en série sur les réseaux usuels mais il est évident que sous 220 volts, par exemple, on pourra installer une série double des séries indiquées ci-dessus. On y gagnera de pouvoir réduire de moitié la section des canalisations centrales pour un même nombre d'arcs. On pourrait craindre que tout le groupe, dont le mauvais fonctionnement d'une unité aurait déréglé la marche, eût des peines à reprendre son état normal en raison de ce qu'il y a ici 4-6 ou 8 lampes qui devront séparément « se remettre au pas ». Il n'en est rien et en général avec des lampes bien réglées on obtient une marche très régulière.

L'usage des dériveurs qui, à l'arrêt d'une lampe, réalisent la fermeture de ses bornes sur une résistance équivalente, est depuis longtemps abandonné dans la marche sous 110 volts et même sous 220. Les charbons sont en effet remplacés à la même heure sur toutes les lampes et il n'y a aucune raison, avec des lampes bien réglées, pour que les crayons de l'une s'usent plus vite que ceux de l'autre.

Pourtant il peut arriver accidentellement qu'un arc s'éteigne, si les charbons glissent de leurs porte-charbons ou si le régulateur se coince empêchant ainsi le rapprochement. Le courant est coupé, mais les charbons des autres lampes revenant au contact, la tention totale s'établit aux bornes de la lampe considérée. La bobine fil fin calculée pour 27 à 50 volts suivant le

type peut en général supporter 110 volts pendant le temps que l'on met à aller ouvrir l'interrupteur. Avec 220 volts et au-dessus elle ne résiste pas.

On emploie souvent dans ce cas un disjoncteur à minima que l'on règle à une intensité supérieure à celle qui correspond à la tension totale aux bornes d'une bobine fil fin; mais assez basse cependant pour ne pas fonctionner sous l'influence des variations du courant en marche normale.

Lumières colorées.

Nous avons signalé déjà qu'un des inconvénients de la lampe par 4 était de produire de la lumière colorée. Bien que l'on voie certains établissements utiliser volontairement, souvent dans un but de réclame, de la lumière à dessein très colorée il n'en reste pas moins certain que la coloration de la lumière constitue un réel défaut, car elle rend le travail de bureau sinon d'atelier très pénible et d'autre part elle change trop l'aspect extérieur des objets pour que beaucoup de commerçants puissent s'en accommoder.

La flamme colorante est produite uniquement par l'âme dont la composition varie d'une maison à l'autre et constitue en général un secret de fabrication. Elle est formée d'un mélange de silicates, sels de manganèse, etc., intimement malaxés avec du charbon de cornue ou une matière similaire grâce à un certain nombre de tours de main que chaque fabricant garde soigneusement. Toutefois dans les résidus on trouve de l'alumine, des borates, de la silice et des fluorures. Cette âme est très résistante. Aussi pour ne pas avoir dans les charbons une chute de tension trop considérable, on les entoure d'une gaine conductrice soit en cuivre, soit en zinc et c'est précisément cette gaine qui occasionne les gouttelettes de scories et tous les inconvénients que nous avons signalés au début dans les lampes par 4, ou d'une chemise en charbon qui n'a pas les défauts précédents mais qui a celui de se casser dans les porte-charbons si elle n'est pas parfaitement adhérente à l'âme. Les globes illuminés par ces arcs sont, suivant les marques de crayons, blancs laiteux ou rosés. Il semble toutefois que la première de ces lumières soit, à égalité de consommation d'énergie, moins fixe et moins éclatante que la seconde. On voit en certains points sur le globe comme des alternatives de lumière et d'ombre, des ondulations donnant l'impression de vagues lumineuses. Cet état, fonction de la nature propre des charbons employés, l'est aussi et pour une grande part du voltage sous lequel fonctionnent les arcs. Avec les mêmes crayons, une augmentation de tension correspond à une augmentation des radiations jaunes dans le globe dont la partie supérieure est jaune d'or, tandis que la partie inférieure moins éclairée reste laiteuse ou rosée suivant les charbons. Pour une même composition de charbons la lumière sera d'autant plus fixe que les matières de la mèche seront broyées en poudre plus fine. L'arc se porte de préférence sur les particules de charbon. Si donc elles se trouvent trop volumineuses il sautera de l'une à l'autre occasionnant des variations de régime. La différence des résultats obtenus à ce point de vue est très sensible. Nous donnons (fig. 6) une courbe d'intensité relevée avec des charbons de fabrication moins bonne que ceux employés dans la courbe type des lampes par 4 (fig. 5). Les amplitudes des variations de l'intensité sont très différentes. Les pompages sont plus fréquents et plus accentués. Dans le même ordre d'idées il est avantageux que l'enveloppe de charbon ne servant que de gaine conductrice, s'use par suite de l'ascension des gaz chauds plus rapidement que l'âme, sinon l'arc qui s'était porté d'abord sur l'âme, passerait après l'usure de celle-ci sur la gaine, pour revenir ensuite à l'âme. L'arc ne pourrait donc pas se centrer et donnerait lieu à des interruptions de lumière se traduisant pratiquement par des fluctuations des plus gênantes.

A. Foulhouze et L. Guedeney.

LES OMNIBUS ÉLECTRIQUES A LONDRES

Tandis que l'industrie de l'automobilisme électrique reste stationnaire en France, une Société vient de se constituer à Londres pour l'exploitation d'omnibus automobiles électriques à 36 places.

Il est intéressant de voir pour quelles raisons les promoteurs de cette entreprise ont préféré les véhicules électriques aux véhicules à pétrole. Nous verrons d'abord le type de voiture qui a été adopté, et les raisons pratiques qui ont conduit à ce choix parmi les voitures électriques: cette voiture porte à Londres le nom « d'Electrobus », mais elle est due à l'industrie française.

Châssis. — Le châssis même de la voiture est composé d'un grand cadre en fer à U du commerce de 140 × 44 de hauteur à âme épaisse et profil normal [1]. Deux traverses en même fer achèvent de donner la rigidité nécessaire.

Les assemblages entre ces fers sont faits de grands goussets, rivés à plat sur les ailes des fers et de plus les âmes sont ajustées l'une sur l'autre par des tôles-cornières rivées sur les âmes.

Cela constitue un châssis d'une grande solidité, et les fers à U profilés du commerce ont été adoptés de préférence à la tôle emboutie parce que ces fers ont dans les coins une surépaisseur forcée que n'a pas la tôle, ce qui augmente beaucoup la résistance à la flexion longitudinale du fer, donc du châssis.

La résistance du châssis de la voiture ne doit pas être beaucoup plus considérable dans une voiture électrique que dans une voiture à pétrole : en effet, les essieux et roues sont du même poids; un véhicule à pétrole en pleine charge pèse environ 6 000 kilogrammes, tandis que la voiture électrique pèse 7 000 kilogrammes, et la voiture électrique est notablement moins longue qu'une voiture à pétrole puisque dans cette dernière il y a un capot sur la longueur; par contre, il faut noter que les caisses d'accumulateurs sont placées au milieu du porte à faux.

Le cadre même du châssis est suspendu par des ressorts à rouleaux ordinaires fort bien proportionnés et très résistants.

L'essieu avant est à chape et ne possède guère qu'une particularité, c'est que l'axe du pivot de la chape est extrêmement rapproché de l'axe de la roue, ce qui présente un avantage notable pour la résistance même de ce pivot, pour l'amplitude de braquage de la voiture et enfin pour la douceur de direction. Ce sont là des avantages qui ne sont pas à dédaigner dans un véhicule qui porte en charge sur cet essieu un poids de trois tonnes et qui est appelé à passer dans des rues dont l'intensité de circulation est de beaucoup supérieure à celle de Paris.

L'essieu arrière est très spécial, nous y reviendrons plus loin, mais nous devons noter ici que les ressorts arrière viennent pour ainsi dire toucher sur la roue la couronne réservée au frein et qu'on a, de la sorte, obtenu la plus grande largeur possible de ressorts à l'arrière. Lorsqu'il s'agit d'un véhicule possédant une impériale, cette très grande largeur de ressorts a une plus grande importance qu'on ne le croit généralement.

Les voyageurs en effet se portent presque tous du même côté de cette impériale, pour voir avec facilité les magasins et les passants, et n'oublions pas pour être précis que quand

[1] Les omnibus à pétrole ont généralement des châssis en fer à U de 120 × 60.

ces voyageurs sont des dames, il faut compter leur curiosité avec un coefficient plus grand que un. Il en résulte, au point de vue mécanique, que la charge porte d'un même côté et tend à faire incliner le véhicule d'une façon désastreuse vers le trottoir, inclinaison accentuée d'autre part par la pente même de la chaussée.

Dans ces conditions, plus les ressorts seront éloignés l'un de l'autre à l'arrière plus le véhicule sera stable et l'inconvénient causé par les voyageurs en sera diminué.

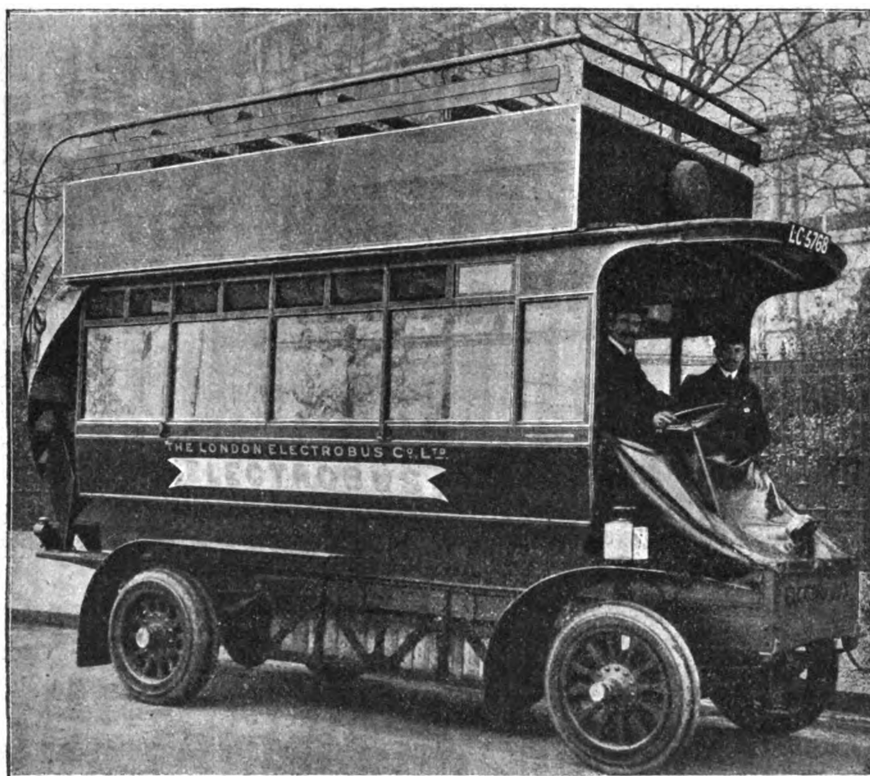


Fig. 1. — Omnibus électrique de Londres.

A l'expérience, la voiture s'est montrée très bien suspendu, cela tient à ce que la lourde batterie d'accumulateurs augmente le poids de la caisse portée par les ressorts d'environ 1 000 kilogrammes en plus du poids d'un véhicule à pétrole ; il en résulte que le rapport entre le poids de la partie non suspendue, c'est-à-dire des roues, des essieux et des freins, d'une part et le poids du châssis, du mécanisme qui y est attaché, de la caisse de carrosserie et des voyageurs d'autre part, est plus considérable. Or on sait que la suspension d'une voiture est proportionnelle au rapport existant entre le poids de l'une et l'autre de ces parties

Il ne faut pas confondre d'ailleurs entre la suspension du véhicule, c'est-à-dire la facilité avec laquelle elle boit les obstacles de la route, sans que le voyageur s'en aperçoive, et les trépidations et bruits que peut causer le mécanisme même de la voiture. Sous ce rapport, l'omnibus électrique l'emporte facilement sur l'omnibus à essence.

Moteur électrique. — Le moteur électrique est fait pour fonctionner sous 90 volts environ et 175 ampères d'une façon continue. Il peut naturellement supporter sans détérioration un régime double pendant une demi-heure environ. Nous n'insistons d'ailleurs pas sur ce point,

car l'omnibus électrique, dans Londres, ne connaîtra jamais de régime aussi élevé, son parcours étant en palier.

Ce moteur est constitué par un inducteur d'une seule pièce en acier coulé avec pôles rapportés au nombre de 4, garnis tous les quatre de bobines à gros fil destinées à être montées en série. Ces bobines sont reliées 2 à 2 en tension et forment alors 2 groupes.

L'induit est plus particulier. Il comporte une seule série de tôles dentées enfilées sur l'arbre d'induit et dans les encoches se trouvent 4 fils dont 2 sont reliés à un collecteur et les 2 autres à un autre collecteur. Ces collecteurs sont situés de part et d'autre de l'induit et sur chacun d'eux frottent 2 lignes de balais, au nombre de 3 sur chaque ligne, les lignes étant situées à 90° l'une de l'autre. Chacun de ces demi-induits est donc bobiné en série. Le nombre de lames sur chacun des collecteurs est voisin de 100, ce qui est très considérable pour une tension aussi faible ; nous verrons plus loin pourquoi.

La vitesse normale de ce moteur sous 90 volts est de 1 100 à 1 200 tours en charge. Les différentes vitesses que l'on peut imprimer au moteur et par conséquent à la voiture sont données de la façon suivante :

Les éléments de la batterie d'accumulateurs, montés en tension, fournissent toujours 90 volts.

La première vitesse est obtenue en lançant le courant dans un rhéostat de démarrage puis dans l'induit dont les enroulements sont reliés en tension, puis dans les inducteurs dont les deux parties sont également reliées en tension.

La seconde vitesse ne diffère de la première qu'en ce que le rhéostat de démarrage n'existe pas.

La troisième vitesse est obtenue par le groupement en quantité des deux moitiés d'induit et le groupement semblable des deux moitiés d'inducteur avec interposition du rhéostat de démarrage qui a servi pour la première vitesse.

Dans la quatrième vitesse ce rhéostat de démarrage est supprimé.

Nous ferons tout de suite remarquer que la première et la troisième vitesse sont des vitesses de passage qui ne doivent pas être employées en service normal puisqu'elles comportent un rhéostat consommant du courant en pure perte.

Nous avons vu que non seulement il y avait couplage des deux demi-induits en tension et en quantité mais encore couplage des deux moitiés d'inducteur de la même façon, cela est destiné à maintenir suffisant le rapport entre les ampère-tours de l'induit d'une part et des inducteurs d'autre part, sans que la résistance des inducteurs soit trop grande. Ceci a une grande importance dans les moteurs de traction, puisqu'ils sont en démarrage continuel.

Cette remarque étant faite, il est évident que la vitesse en seconde est très sensiblement moitié de la vitesse en quatrième, laquelle correspond à 20 kilomètres à l'heure.

Il n'est nullement prouvé que l'emploi de 2 vitesses seulement, aussi espacées, puisse satisfaire autant que l'emploi d'un plus grand nombre de vitesses. Car pour maintenir une vitesse intermédiaire il faut constamment couper le courant puis le rétablir.

Nous signalerons maintenant la grande légèreté du moteur électrique. Il est superflu d'insister sur l'importance, pour un véhicule électrique où l'on dispose dans les accumulateurs d'une réserve d'énergie limitée et coûteuse, d'être un véhicule léger. La plus grande légèreté possible des inducteurs a été obtenue en ne faisant passer dans ceux-ci que le moins possible de flux, ce qui réalise une évidente légèreté et de plus encore en mettant très peu de fils sur les inducteurs. De cette façon, le nombre d'ampère-tours des inducteurs est très faible, et si faible qu'il y aurait lieu de craindre qu'une torsion notable du champ et un crachage intense des balais ne se produise. Pour qu'il n'en soit rien, le nombre des lames

au collecteur a été poussé à 100 et le nombre des fils reliés à chaque lame des collecteurs a été réduit à 2 ; de cette façon la force électromotrice et l'intensité du courant de commutation sont aussi faibles que possible et il n'y a aucun échauffement des balais.

Combinateur. — Il se compose fort simplement d'un cylindre en bois avec touches en bronze placées sur lui en saillies. Ces touches se déplacent devant des balais qui frottent sur elles, tous ces balais sont doubles, étant donnée l'intensité du courant à interrompre. Ces balais sont connectés aux différents circuits.

Le cylindre de combinateur est placé horizontalement ; il est manœuvré par un levier placé à gauche du conducteur, exactement au milieu du siège ; il est donc manœuvré de la main gauche ; les mouvements du cylindre sont assurés d'un façon exacte dans la position convenable par une roue à encoches fixée sur ce cylindre et dans lesquelles vient prendre un cliquet muni d'un rouleau à son extrémité.

En outre des quatre vitesses avant, ce combinateur porte deux freins électriques de sûreté et deux positions de marche arrière qui sont d'ailleurs les mêmes que celles de la marche avant, le courant étant simplement inversé dans l'induit.

Transmission. — Nous allons examiner comment le mouvement est transmis du moteur aux roues dans l' « Electrobus », puis nous verrons pourquoi cette transmission a été adoptée.

Le moteur électrique, placé tout à l'avant du véhicule, est fixé invariablement à un faux châssis rivé rigidement sur le châssis principal. Sur l'arbre de l'induit est fixé un pignon très large et vis-à-vis de ce pignon une grande couronne dentée, qui reçoit le mouvement du moteur par l'interposition d'une chaîne variétur de 60 millimètres de large et fournissant la démultiplication de 3. Notons tout de suite, que l'emploi de cette chaîne s'est imposé pour éviter le bruit que produirait probablement une chaîne brampton passant sur un pignon tournant à 1 200 tours.

La grande roue dentée solidaire de 2 tambours de freins est montée folle sur un axe fixe; cet axe est attâché au moteur lui-même par deux colliers.

En calant plus ou moins les supports de cet arbre on peut éloigner ou rapprocher les 2 engrenages de la chaîne variétur par conséquent en changer la tension.

Le mouvement est transmis de ce premier groupe à l'essieu arrière par un long tube muni à ses 2 extrémités de 2 cardans. L'un d'eux est extensible et placé dans l'intérieur même de la poulie dont nous venons de parler, l'autre fait partie de l'essieu arrière.

Ce cardan extensible, nécessité par le mouvement de recul de l'essieu arrière dans le passage des cahots, est constitué par 4 coussinets glissant sur des tiges fixées à l'autre partie du cardan. L'avantage de cette disposition est de pouvoir faire en sorte que les coussinets dont nous parlons, agissant à l'extrémité d'un fort bras de levier, se trouvent pouvoir glisser, malgré la pression qu'ils transmettent, sans risquer aucun grippage ; il n'en est pas ainsi dans des modèles de cardan dont les dimensions sont réduites.

L'essieu arrière est de construction très spéciale : nous y insisterons d'autant plus que c'est là le point de la voiture qui peut être le plus facilement critiqué au point de vue de la solidité, si l'on en ignore la construction.

Cet essieu est composé d'un axe rond allant d'une roue à l'autre et ayant 70 millimètres de diamètre ; la roue gauche est fixée sur cet axe et tourne avec lui. La roue de droite est entraînée par un manchon passant par-dessus l'axe ; dans le moyeu de la roue droite se trouve donc un coussinet qui travaille lorsque les roues ont une vitesse inégale, dans les tournants par exemple.

Le différentiel est interposé entre l'axe lui-même et le tube, au milieu de la voiture. La couronne extérieure de ce différentiel est alors attaquée par un pignon d'angle actionné par

le cardan. De ce côté rien de particulier, rappelons seulement que, dans cet essieu, c'est un axe plein et d'une seule pièce allant d'une roue à l'autre et tournant avec ces roues qui porte la charge ; au point de vue solidité cet axe peut par conséquent être toujours établi en dimensions suffisantes et en matières suffisamment résistantes, comme l'acier-nickel, pour résister aux plus lourdes charges.

Cet essieu tournant passe, aux attaches des ressorts, dans 2 coussinets dans lesquels il tourne à la façon des essieux de wagons ordinaires. Ces ressorts sont placés extrêmement près des roues elles-mêmes, afin d'éviter dans la plus large mesure possible le porte à faux, entre la roue qui sert de point d'appui et le ressort qui porte la charge et de soulager l'essieu arrière.

La réduction donnée par l'engrenage d'angle sur l'essieu différentiel est de 4 seulement; il peut posséder dans ces conditions un bon rendement.

Pour le choix de la transmission mécanique à adopter, on ne s'est pas préoccupé principalement du rendement théorique de cette transmission mais bien de la facilité de visite et d'entretien de cette transmission et du moteur électrique.

Cette anomalie tient à ce que l'analyse sérieuse du rendement de la transmission mécanique, avec les différents systèmes que l'on peut employer, ne fait guère ressortir que des différences de rendement de 3 à 5 % environ.

Les différents systèmes qui peuvent en effet être employés sont :

1° Celui que nous venons de décrire ;

2° La transmission dite par chaîne ; qui consiste à attaquer les roues arrière par une chaîne brampton ordinaire fournissant une démultiplication de 3 au plus, commandée par un arbre intermédiaire qui est déjà démultiplié de 4 par rapport au moteur à l'aide d'un engrenage ;

3° La transmission par engrenages dans laquelle le moteur fixé à l'essieu arrière commande la roue par un double relais d'engrenages.

Il sera facile de voir en indiquant par des chiffres approximatifs le rendement des différents organes de transmission mécanique mis en jeu, et le rendement différent de 1 ou 2 moteurs électriques, que ces systèmes ne diffèrent guère entre eux.

Dans ces conditions, il a semblé plus important de veiller à ce qu'un bon entretien du moteur électrique et de la transmission puisse être facilement assuré ; en effet si les collecteurs sont inaccessibles et si le moteur est susceptible d'être souillé par l'eau ou par des aspersions d'acide des accumulateurs, le rendement en serait infiniment plus altéré.

De ce côté l' « électrobus » donne pleine satisfaction. Le moteur électrique placé à l'avant de la voiture est à l'abri de l'eau d'une façon absolue, bien qu'il ne soit même pas cuirassé. Sa ventilation est aussi très bonne, son accès des plus faciles et rien qu'en enlevant le plancher du siège on se trouve avoir un moteur aussi dégagé qu'un moteur d'atelier, sans avoir même à se baisser.

La chaîne variétur est également facile à atteindre en même temps que le moteur.

Enfin l'espace réservé aux accumulateurs sous la voiture est complètement libre de chaque côté du cardan longitudinal et l'on peut avec facilité soit tirer les batteries de côté, soit les descendre verticalement par un ascenseur pour les changer. Cette position des batteries est excellente pour la conservation même du châssis, car toutes les fuites d'acide provenant de la batterie tombent sur le sol sans jamais atteindre ni le moteur ni les organes de transmission, comme cela arrive malheureusement dans beaucoup de voitures actuelles.

On obtient, par ce système, le silence le plus absolu et aucune trépidation ne se transmet du moteur à la caisse de carrosserie. Cet avantage n'est pas négligeable, car, par exemple, dans les voitures à chaînes, en raison de la position du moteur, des vibrations se transmet-

tent à la caisse de carrosserie qui les amplifie notablement ainsi que le bruit et les transforme en un véritable bourdonnement fort désagréable pour les voyageurs.

Enfin nous ferons remarquer que ce système, contrairement au système par engrenages en particulier, donne presque l'obligation d'avoir un essieu arrière léger, ce qui soulage beaucoup les caoutchoucs des roues arrière et les ressorts, sans compter que la suspension de la voiture n'en est que meilleure ; ce qui concourt à la conservation des accumulateurs et du mécanisme entier.

Les chiffres suivants qu'il nous a été donné de constater dans un essai de cette voiture, lors de sa réception, montrent le rendement de la transmission : en palier, sur un bon macadam, à la vitesse de 20 kilomètres à l'heure, nous avons obtenu une consommation de 66,8 watts-heure à la tonne-kilomètre et sur le même terrain à la vitesse de 23 kilomètres à l'heure nous n'avons consommé que 69 watts-heure à la tonne-kilomètre.

Accumulateurs. — La batterie comporte 44 éléments en deux caisses, placées sous le châssis même et de part et d'autre du cardan. Ces éléments sont à plaques très minces de 3 millimètres environ, maintenues par des séparateurs en ébonite perforée à côtes. Le bac est en bois doublé de plomb et a 270 millimètres de longueur, 165 millimètres de largeur et 320 millimètres de hauteur. L'isolement entre les plaques et le bac est fait au moyen de feuilles d'ébonite.

La capacité est de 500 ampère-heures au régime en cinq heures.

L'entretien et la charge en sont assurés à forfait pour le prix de 0 fr. 30 par mille anglais (1 609 mètres). Ce prix paraît très bas ; mais le prix du kilowatt en courant continu n'est que de 0 fr. 07 fourni par un secteur, et, surtout, les constructeurs d'accumulateurs comptent sur une grande durée causée par la faible consommation du véhicule, sa faible vitesse, le parcours complet effectué en palier et sur asphalte avec seulement quelques passages en excellent pavé de bois, par conséquent absence complète de secousses et de régimes de décharge élevés.

Freins. — Les freins sont au nombre de 3 dont un agissant sur les 2 roues arrière et les 2 autres agissant sur les 2 tambours placés derrière la chaîne variétur. Ces 3 freins sont commandés au pied ; ni les uns ni les autres ne coupent le courant en sorte qu'il est nécessaire avant de donner un coup de frein de couper le courant par le combinateur.

Caisse. — Au point de vue de la carrosserie, la photographie en donne une idée suffisante. Le nombre des places disponibles est de 34, 16 à l'intérieur et 18 à l'impériale.

Prix de revient. — Les questions de prix de revient ont été naturellement la cause déterminante qui a fait adopter la traction électrique de préférence à la traction à pétrole.

Mais même avant toute question de prix il y a lieu de faire ressortir en faveur de « l'électrobus » sur les omnibus à pétrole les avantages suivants :

Pas d'odeur ; pas de bruit ni de trépidation ; pas de danger d'incendie ; plus grande propreté du véhicule lui-même et absence de pertes d'huile dans la rue ; moins grande chance d'arrêt dans le fonctionnement du mécanisme qui est infiniment plus simple et ne demande pas au conducteur d'être un véritable mécanicien ; plus grande facilité de direction d'une part et de variations de vitesse de l'autre, permettant la circulation de ce véhicule dans les endroits les plus encombrés.

Ces raisons ont été prises en considération par les autorités qui ont permis la circulation de cet omnibus dans les quartiers les plus encombrés de Londres.

En dehors de ces avantages qui sont immédiats, il ressort un avantage au point de vue économique :

Commençons par établir le prix de traction d'un omnibus à pétrole dans les conditions

actuelles et d'après les renseignements que nous avons pu nous procurer auprès des Compagnies d'omnibus elles-mêmes.

Les prix d'entretien peuvent se répartir de la façon suivante par mille anglais parcouru :

Entretien des caoutchoucs, prix à forfait par les fabricants de 0 fr. 175 à 0 fr. 20..	0 fr.	20
Entretien mécanique comprenant le remplacement de toutes les pièces usées et l'amortissement du châssis de 0 fr. 60 à.	0	80
Consommation d'essence par mille parcouru $0^l,800$, soit à 0 fr. 14 le litre.	0	112
Consommation d'huile.	0	02
Chauffeur-mécanicien.	0	07
Soit au total.	1 fr.	202

Si nous établissons le même compte pour l'omnibus électrique nous trouvons les chiffres suivants par mille anglais :

Entretien mécanique et amortissement du châssis.	0 fr.	50
Entretien des caoutchoucs à forfait.	0	17
Charge et entretien des accumulateurs à forfait.	0	30
Mécanicien..	0	07
Total.	1 fr.	04

Ceci fait ressortir pour l'omnibus électrique un avantage de 0 fr. 16 par mille anglais.

Dans ces conditions et devant ces avantages il y avait lieu de tenter l'expérience, ce qui a été fait d'abord sur un véhicule. Les essais ont donné toute satisfaction et la Société de mise en exploitation s'est définitivement constituée.

Il sera très intéressant de suivre les résultats de cette tentative dont le succès pourrait donner à l'automobilisme électrique un débouché inattendu.

R. Lacau.

REVUE INDUSTRIELLE ET SCIENTIFIQUE

THÉORIES ET GÉNÉRALITÉS

Sur l'effet photo-électrique d'une électrode en métal alcalin placée dans l'argon, l'hélium et l'hydrogène. — **Dember.** — *Drudes Annalen*, juin 1906.

Si l'on classe les métaux d'après la grandeur de leur sensibilité photo-électrique, particulièrement vis-à-vis des ondes lumineuses de grande longueur, on obtient une série qui concorde avec la série des f. é. m. des métaux. Le métal le plus électropositif est aussi le plus sensible au point de vue photo-électrique dans les gaz. Dans le vide, au contraire, Ladenburg n'a pas observé ce parallélisme. Il existe aussi entre la chute cathodique normale et la place occupée par le métal considéré dans la série des f. é. m. une relation analogue à celle observée entre les propriétés chimiques et la grandeur de l'effet de Hallwachs. Une théorie de phénomènes photo-électriques, établie par G. C. Schmidt, rend probable l'existence d'une relation entre la sensibilité photo-électrique et la valeur de la chute cathodique normale. D'après cette théorie, la lumière tombe sur la cathode et y disperse de l'électricité négative. Les électrons libérés par les oscillations de la lumière agissante ionisent le gaz aux environs de la cathode et abaissent la chute de potentiel en ce point. D'après cela, les différences dans la valeur de la chute cathodique pour différents métaux, ou l'influence de la matière constituant l'électrode, dépend de la sensibilité différente des électrodes. D'après cette théorie, on doit attendre un effet photo-électrique plus intense dans les gaz dans lesquels la plus petite chute de tension est observée.

Les plus faibles chutes cathodiques ont été

trouvées par Warburg, Capstick, Strutt, Mey et Defregger dans l'hydrogène, l'azote, l'hélium et l'argon. Le tableau suivant indique les chiffres trouvés. La nature du métal constituant l'électrode est indiquée en haut des colonnes, et le gaz contenu dans le tube est indiqué à gauche des lignes.

	Pt	Hg	Ag	Cu	Fe	Bi	Zn	Al	Mg	Na	K—Na	K
H_2. . . .	300	»	295	280	230	»	213	190	168	185	169	172
N_2. . . .	232	226	»	»	»	»	»	»	207	178	125	170
He. . . .	226 / 160	142,5	162	177	161	131	143	141	125	80	78,5	69
Arg. . . .	167	»	»	»	»	»	»	100	»	»	»	»

D'après les chiffres de ce tableau, on doit s'attendre à trouver une très grande sensibilité photo-électrique des électrodes alcalines dans l'hélium. L'auteur s'est proposé d'étudier ce point.

L'auteur a choisi comme substance photo-électrique un alliage liquide de potassium et de sodium dans le rapport moléculaire. Une méthode particulière, basée sur celle qu'ont indiquée Elster et Geitel, permettait d'introduire dans les tubes à décharge l'alliage dépourvu de gaz et très pur. L'auteur décrit également la méthode employée par lui pour obtenir de l'hélium et de l'hydrogène pur.

Pour mesurer l'effet photo-électrique dans l'hydrogène et l'hélium, l'auteur a employé la méthode utilisée par Stoletow et par Schweidler : cette méthode repose sur la mesure galvanométrique du courant photo-électrique produit. Le galvanomètre était du type Desprez d'Arsonval et avait une sensibilité de $4,6 \cdot 10^{-9}$. La tension nécessaire (jusqu'à 1 200 volts) était fournie par une petite batterie d'accumulateurs et le potentiel restait bien constant : une résistance liquide permettait de modifier la tension électrique à l'électrode de potassium-sodium. Le pôle négatif de la batterie était relié à la partie inférieure de la résistance ; la partie supérieure de celle-ci était reliée à la terre : un tube de verre mobile, dans lequel était placé un fil de cuivre et une pointe de platine soudée à l'extrémité du tube, permettait de faire varier la valeur de la résistance intercalée. La tension à la cathode était mesurée au moyen d'un électromètre à quadrants de Thomson, à montage idiostatique. La cathode était reliée à une paire de quadrants : l'autre paire et l'aiguille étaient reliées à la terre. Un commutateur permettait d'échanger entre elles les deux paires de quadrants. Pour calculer la tension, on pouvait employer la relation $V = C\sqrt{\alpha}$, V designant le potentiel, α la déviation correspondante en divisions de l'échelle, et C la constante de l'électromètre. L'étalonnage de l'appareil était fait au moyen d'une forte résistance de valeur connue par une mesure de l'intensité de courant avec un voltmètre de précision.

La source lumineuse qui devait provoquer la dispersion photo-électrique était une décharge par effluves qui se produisait dans le même gaz que l'effet photo-électrique. En introduisant des électrodes métalliques, on chercha à produire au-dessus de la cathode, à une faible distance de celle-ci, une décharge par effluves. On se heurta à des difficultés, à cause des impuretés gazeuses qui se dégageaient des électrodes : particulièrement dans les tubes à hélium, on constatait au bout de peu de temps les raies du spectre de l'hydrogène. Pour triompher de cette difficulté, on munit le tube d'électrodes extérieures placées sur deux tubulures existant à la partie supérieure du tube. La bobine d'induction employée était munie d'un interrupteur Desprez présentant une régularité aussi parfaite que possible.

Le tube contenait, à environ dix centimètres de la cathode, un cylindre creux en laiton, fixé à la paroi. Les ouvertures supérieure et inférieure étaient recouvertes d'une toile métallique ; le tout était relié à la terre : ce dispositif avait pour but d'empêcher l'ionisation du gaz. Avant d'introduire l'alliage dans le tube, on soumettait la cathode à la haute tension (1 200 volts) et l'on mettait en marche la bobine. Le galvanomètre ne présentait aucune déviation, ce qui prouvait l'absence d'ionisation du gaz.

Les mesures étaient faites l'une après l'autre dans l'hydrogène, dans l'hélium, et à nouveau dans l'hydrogène. Quand l'interrupteur de la bobine fonctionnait bien, c'est-à-dire quand l'éclairement était constant, les deux courbes des valeurs obtenues pour l'hydrogène coïncidaient entre elles. Les tableaux suivants indiquent les résultats obtenus dans les deux gaz pour une pression de 3 millimètres.

Pour 368 volts, il se produisait une décharge en effluves dans l'hydrogène et pour 206 volts dans l'hélium : à ce moment, l'intensité du cou-

rant croissait énormément. L'action des rayons lumineux sur la cathode abaisse le potentiel total nécessaire pour la production de la décharge.

Hydrogène $p = 3$ mm.

E	J
285 volts	10,1 . 10^{-9} ampères
328 —	19,3 —
360 —	30,0 —
368 —	très grand

Hélium $p = 3$ mm.

E	J
193 volts	11,5 . 10^{-9} ampères
200 —	16,1 —
203 —	
205 —	37,0 —
206 —	très grand

Aussitôt que la décharge a commencé, la valeur du potentiel s'abaisse. On doit donc distinguer trois potentiels: celui qui correspond à la décharge sans cause extérieure; celui qui correspond à la décharge quand la lumière agit, et celui qui correspond à l'entretien de la décharge.

D'autres expériences ont été faites avec des tubes plus simples soumis à l'action de la lumière d'une lampe Nernst. Malgré l'absence des rayons ultraviolets, l'allure du courant photo-électrique était la même. Les tableaux suivants indiquent les résultats obtenus avec l'hydrogène et l'hélium pour une pression de 3 millimètres et un éclairement produit par une lampe Nernst.

Ces résultats montrent que, pour des tensions comprises entre 40 et 110 volts, le courant photo-électrique est plus intense dans l'hélium que dans l'hydrogène à la même pression.

Les valeurs de la chute cathodique normale dans l'argon, trouvées par Strutt, sont les suivantes :

avec du platine. . . .	167 volts
— de l'aluminium. .	100 —

Dans l'hélium, on a trouvé :

avec de l'aluminium. .	141 volts	(Defregger)
— du platine. . .	226 —	(Strutt)
— —	160 —	(Defregger)
— du platine. . .	168 —	—

Hydrogène $p = 3$ mm.

E	J
77,8 volts	4,6 . 10^{-9} ampères
125,0 —	6,8 —
222,0 —	18,4 —
290,0 —	32,7 —
318 —	39,7 —
356 —	56,1 —
389 —	75,9 —
459 —	148,6 —
473 —	172,5 —
485 —	192,3 —

Hélium $p = 3$ mm.

E	J
52,0 volts	40,0 . 10^{-9} ampères
56 —	49,3 —
61 —	63,0 —
72 —	88,8 —
79 —	101,0 —
85 —	124,0 —
102 —	162,0 —

Les mesures de Strutt et Defregger ayant donné des résultats très différents pour la chute cathodique avec du platine dans de l'hélium, l'auteur a fait une série de mesures de cette grandeur dans l'hélium. La cathode était un fil de platine poli de 2 millimètres de diamètre et 60 millimètres de longueur placé dans un tube de 20 centimètres de longueur et 30 millimètres de diamètre intérieur. La distance de la sonde à la pointe cathodique était de 4 à 5 millimètres. L'anode était un fil d'aluminium de 1,5 millimètre de diamètre. Le pôle positif d'une batterie à haute tension était relié à l'électrode d'aluminium ; la cathode de platine était reliée à la terre après intercalation d'un téléphone. La sonde, formée d'un fil très fin en platine recouvert, sauf une très petite pointe, d'une couche de verre, était reliée à l'électromètre à quadrants : cette sonde pouvait, au moyen d'un basculeur, être reliée tantôt à l'une, tantôt à l'autre paire de quadrants. La moyenne des résultats de mesures a été égale à 165 volts. La différence avec le résultat de Defregger provient peut-être de ce que l'hélium employé par cet expérimentateur contenait de l'argon.

L'auteur a étudié ensuite la chute cathodique de l'alliage de potassium et sodium dans l'argon. Les mesures étaient faites avec des pressions de 4 à 6 millimètres pour une distance de 6 à 8 millimètres de la sonde. On trouva les valeurs de 67, 63, 60, 63, 62,2 volts soit 63 volts en moyenne.

Pour le platine dans l'argon, l'auteur a trouvé comme moyenne 163 volts.

La différence de sensibilité dans l'argon et l'hélium est montrée par les chiffres des tableaux suivants.

Hélium $p = 1^{mm},5$.

E	J
40,8 volts	$3,2 . 10^{-9}$ ampères
75,2 —	3,7 —
184,2 —	13,8 —
259,8 —	46,5 —
284,8 —	57,5 —
309,4 —	94,3 —
330,2 —	163,3 —
344,5 —	259,9 —

Argon $p = 1$ mm.

E	J
108,6 volts	$4,6 . 10^{-9}$ ampères
173,5 —	9,2 —
212,3 —	13,8 —
229,6 —	14,4 —
256,2 —	27,6 —
281,9 —	39,1 —
292,6 —	55,2 —
317,7 —	96,6 —
341,9 —	284,4 —
346,2 —	303,6 —
365,8 —	Décharge par effluves

Argon $p = 2$ mm.

E	J
130,3 volts	$2,3 . 10^{-9}$ ampères
250,3 —	19,1 —
314,6 —	144,0 —
319,8 —	183,2 —
327,2 —	267,3 —
330,1 —	306,8 —

R. V.

Séparation du radium C du radium B. — **F. v. Lerch.** — *Drudes Annalen*, juin 1906.

La théorie de la transformation de Rutherford admet la formation successive de corps dérivant les uns des autres : il se forme du radium A qui se transforme très rapidement, puis du radium B qui n'émet aucun rayon ionisant, puis du radium C. Les autres produits de transformation sont rassemblés sous le nom d'activité résiduelle. Chaque substance apparaît avec la vitesse avec laquelle se décompose la précédente, et disparaît avec sa vitesse propre de décomposition. Si l'on exprime mathématiquement la théorie de ces phénomènes, on obtient une série d'équations différentielles faciles à indiquer. Le résultat, pour différents cas, est toujours une somme de fonctions exponentielles, dans laquelle il peut y avoir aussi des termes négatifs. Si l'on poursuit le calcul pour le cas où il se produit, par la transformation d'une substance inactive B une substance radiante C, on obtient pour la quantité de substance C existant au temps t l'expression :

$$J_t^C = \frac{J_{t_0}^B \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}).$$

S'il existe au temps $t = 0$ la quantité $J_{t_0}^B$ de substance inactive B, de laquelle dérive la substance active C, λ_1 et λ_2 désignent les constantes de transformation pour B et C. L'expression J_t^C croît d'abord avec le temps, atteint un maximum pour $t = (\log_{nat} \lambda_2 - \log_{nat} \lambda_1)/(\lambda_2 - \lambda_1)$, puis diminue, au bout d'un temps assez long, proportionnellement à $e^{-\lambda_1 t}$, quand λ_1 est plus petit que λ_2, ou proportionnellement à $e^{-\lambda_2 t}$ quand λ_1 est plus grand que λ_2.

Si, par exemple, la substance C a la plus grande constante de transformation, au bout d'un temps assez long la quantité existante varie proportionnellement à $e^{-\lambda_1 t}$, c'est-à-dire est proportionnelle à la quantité de radium B existante. On peut désigner cet état comme un état d'équilibre. Si, de la dernière partie de la courbe de décroissance, on a déduit l'une des constantes λ, on peut, d'après la première partie de la courbe, calculer l'autre λ. La courbe ne permet pas de déterminer quelle est celle des deux constantes λ qui s'applique à la première ou à la seconde transformation.

L'activité des corps induits portés pendant peu de temps à l'incandescence diminuant plus

vite que celle des corps non portés à l'incandescence, on a dû en conclure que l'incandescence influe sur la diminution de l'activité. Cette difficulté peut être résolue si, comme Bronson, on attribue à la substance inactive B la plus grande constante, et à la substance active C la plus petite. Par suite de l'incandescence, la substance B est plus influencée que la substance C et il reste un excédent de celle-ci qui, d'après sa loi propre, diminue plus vite.

L'auteur a étudié les séparations de B et C. Cette étude a porté sur des solutions préparées par cuisson de tôles de platine enduites avec des solutions d'acides forts. L'activité était mesurée par la vitesse avec laquelle se décharge une paire de quadrants d'un électromètre de Dolezalek. Le quadrant relié constamment à un conducteur donnait, pour une quantité d'électricité de 1 volt × 41 centimètres une déviation de 130 divisions environ. De même que pour le thorium B et le thorium A, on peut séparer le radium C du radium B par immersion d'un métal ou par électrolyse. Du cuivre ou du nickel immergé ne sépare que le radium actif C : par électrolyse avec une faible densité de courant, on obtient un dépôt cathodique actif qui présente une constante de demi-décomposition de 19,5 minutes. De même que pour le thorium, la partie constitutive active du métal le plus noble au point de vue électrochimique présente la plus faible constante. On peut aussi réaliser des expériences analogues sur l'état d'équilibre, montrant la transformation de radium B en radium C.

Du plomb et du fer immergés séparent le radium C des solutions acides, ainsi qu'un peu de radium B ; le platine est inactif, l'argent et le palladium sont très peu actifs. L'activité séparée par le plomb et le fer diminue d'abord plus rapidement, puis cette diminution atteint la valeur de B, comme pour les tôles portées à l'incandescence. L'incandescence produit aussi une faible volatilisation de B jusqu'à un faible reste, et l'excédent de C diminue suivant son régime propre plus rapide. On a calculé ainsi pour les différentes parties successives des courbes représentant les résultats d'observation, la valeur des constantes de demi-décomposition :

Pour une feuille de platine portée pendant une minute à l'incandescence au moyen d'un chalumeau :

20,2 ; 21,5 ; 24,5 ; 26,25 minutes.

Pour une feuille de fer plongée pendant 26 minutes dans HCl :

22 ; 23,5 ; 24,5 minutes.

Pour un fil de plomb plongé pendant 25 minutes dans HCl :

24 ; 25,5 ; 26,7 minutes.

Comme pour les inductions de thorium, la constitution superficielle de l'électrode est d'une grande importance pour les dépôts électrolytiques. Le cuivre ne sépare par lui seul que le radium C ; le platine platiné reste inactif ; le platine platiné immergé avec du cuivre sépare le radium B. Dans deux cuves électrolytiques en série, munies d'électrodes de platine de 2 × 2^{cm},5, l'électrolyse pendant 18 minutes avec 0,0095 ampère d'une solution d'induction acide a donné à la cathode de platine presqu'uniquement du radium C, et à la cathode de platine platiné du radium C aussi, comme l'a montré la transformation du dépôt. L'anode en platine était inactive. On a obtenu de fortes activités anodiques avec des anodes en argent dans l'électrolyse de solutions d'induction de HCl, en plomb dans des solutions de SO^4H^2, et en cuivre dans des solutions de potasse. Dans une solution neutre, une anode en platine devenait active.

Les deux inductions de radium étant plus nobles électrochimiquement que l'hydrogène, on peut aussi obtenir, avec des électrodes platinées, des dépôts cathodiques actifs avec des tensions inférieures à la tension de décomposition de HCl. On n'a pas pu arriver à une séparation de B et C par l'emploi de différentes tensions. Cette séparation de B et C a pu être faite autrement. Des sels métalliques, ajoutés à une solution d'induction et précipités au bout de quelque temps, emportent avec eux l'activité. Du nitrate de baryum, ajouté à une solution d'induction de HCl et précipité après une minute par SO^4H^2 entraîne avec lui le radium B ; en filtrant, on trouve, après vaporisation, du radium C pur.

Si l'on ajoute du sulfate de cuivre à une solution d'induction de HCl et que l'on précipite au bout d'une minute avec de la potasse à chaud, il se dépose, avec le cuivre, un peu de radium B avec un excédent de C. En filtrant, on obtient le B pur.

Donc, par la précipitation du baryum on obtient le radium C, et par précipitation du cuivre,

on obtient le radium B. Le plomb, ajouté à une solution de AzO^3H et précipité au moyen d'acide sulfurique à chaud, permet d'obtenir, par filtration, le radium C. Le zinc, l'argent et le fer permettent bien d'obtenir aussi des dépôts actifs, mais ne permettent pas la séparation du radium B et du radium C.

De quinze courbes tracées pour le radium C, l'auteur a déduit comme valeur moyenne de la constante de demi-décomposition 19,6 minutes. Les limites extrêmes étaient 19,24 et 19,95 minutes.

Pour obtenir l'autre constante, l'auteur a tracé plusieurs courbes relatives à des tôles induites pendant une heure environ. Comme moyenne de 12 courbes, dont les constantes étaient comprises entre 27 et 28, il a trouvé 27,4 pour la valeur moyenne de la constante de demi-décomposition au bout de 4 h. 45′ après éloignement de la préparation active, c'est-à-dire au bout de 4 h. 15′ après obtention des maxima.

Pour avoir une idée de la rapidité de passage des courbes de décomposition en fonction simple en e ($e^{-\lambda_2\tau}$ négligeable vis-à-vis de $e^{-\lambda_1\tau}$), on peut faire le calcul simple suivant : si une substance se décompose d'après une fonction simple en e, elle possède une constante de demi-décomposition :

$$\mathrm{HC} = \frac{\log_{nat} 2}{\lambda} = \frac{\mathrm{J} \log_{nat} 2}{d\mathrm{J}/dt}. \qquad (1)$$

D'une façon générale, la quantité de radium C existante est donnée par la différence de deux fonctions en e, si l'on fait abstraction du radium A, ce qui, d'après les résultats précédents, est certainement admissible. Le maximum est atteint pour $d\mathrm{J}/dt = 0$: on a

$$\mathrm{J}_c = a\left(e^{-\lambda_1\tau} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} e^{-\lambda_2\tau}\right). \qquad (2)$$

On tire des équations (1) et (2) la valeur de la constante

$$\mathrm{HC} = \frac{\log_{nat} 2\,(\lambda_2 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{-\lambda_2 t})}{\lambda_1\lambda_2\,(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})}. \qquad (3)$$

La constante HC_2 est égale à 19,5 minutes pour le radium C, d'après les mesures directes. La constante HC_1 pour le radium B doit être choisie de telle façon que, après 4 h. 1/4 environ après le passage au maximum, on obtienne une constante égale à 27,4 minutes. On a $\mathrm{HC} = 26{,}7$ minutes.

TABLEAU I

TEMPS EN HEURES	CONSTANTE EN MINUTES	TEMPS EN HEURES	CONSTANTE EN MINUTES
0	∞	3 1/2	27,81
0,5	48,31	4	27,50
1	35,97	4 1/2	27,28
1 1/2	31,96	5	27,13
2	30,03	6	26,93
2 1/2	28,96	10	26,72
3	28,26	∞	26,7

Par suite de la faible différence des deux constantes de demi-décomposition, la constante HC de l'équation (3) ne s'approche que lentement de la valeur $\log_{nat} 2/\lambda_1 = \mathrm{HC}_1$. Après 3 heures 1/2 environ, elle concorde avec la valeur de 28 minutes trouvée par Curie.

Les tableaux II et III indiquent, pour deux cas, la concordance entre les valeurs calculées et les valeurs observées.

TABLEAU II

Baryum précipité d'une solution.

TEMPS EN MINUTES	ACTIVITÉ	
	OBSERVÉE	CALCULÉE
0	501	515
3,5	522	528
8,2	543	533
18	520	513
33,7	440	435
37,1	413	415
61,8	279	275
65,7	253	256
107,5	108	107
113,3	95	94
155,7	35,4	35,1
170,2	24,8	24,8
178,5	20,2	20,2

Conclusion. — Les résultats de l'étude qui précède peuvent être résumés de la façon suivante :

Le radium C le plus noble électriquement possède la plus faible constante de demi-décomposition et peut être séparé du radium B par le cuivre et par le nickel, ainsi que par électrolyse à faible densité de courant avec une cathode en platine pur (analogie avec les inductions du thorium).

TABLEAU III

Résidu du filtrage après la précipitation du cuivre.

TEMPS EN MINUTES	ACTIVITÉ	
	Obs.	Calc.
0	362	359
1,5	380	383
2	392	389
3	401	402
4,5	410	419
5,5	430	430
9,25	456	456
13,5	475	480
15	482	484
16,5	494	488
17,5	496	489
19	490	490
26	482	481
27,5	483	478
29	466	473
42,5	413	414
44,8	399	403
47	387	391
49	380	380
80	223	224
82	214	215
118	100	101,0
120	95	96,6
172,5	28,5	28,5
198,2	15,2	15,27

La transformation du radium B en radium C rapidement décomposable peut être montrée par des séparations directes. Même avec des tensions inférieures à la tension de décomposition de HCl, on obtient des dépôts cathodiques actifs.

L'anode reste inactive quand on emploie une solution acide. Quand l'anion est composé, on obtient aussi des dépôts anodiques actifs. Dans une solution neutre, l'anode est faiblement active; dans une solution alcaline, elle est fortement active.

Si l'on ajoute à une solution d'induction d'acide chlorhydrique du nitrate de baryum et si l'on précipite par l'acide sulfurique, le radium B est entraîné par le baryum et le radium C reste au filtrage.

Le cuivre, précipité par une lessive alcaline, entraîne le radium C avec une partie du radium B : le reste du radium B est obtenu par filtration.

Comme constantes, l'auteur a trouvé :

Pour le radium B : $HC_1 = 26{,}7$ minutes ; $A_1 = 4{,}327 \cdot 10^{-4}$ p. sec.

Pour le radium C : $HC_2 = 19{,}5$ minutes ; $A_2 = 5{,}924 \cdot 10^{-4}$ p. sec.

B. L.

GÉNÉRATION ET TRANSFORMATION

Sur la résistance de passage de balais en charbon et de balais formés d'un mélange de charbon et de métal. — **S. Salto.** — *Annalen der Elektrotechnik*, juin 1906.

L'auteur a fait une série de mesures pour déterminer les valeurs de la résistance de passage présentée par les balais en charbon pur et par les balais contenant une adjonction de métal. Pour éviter toute perturbation mécanique pouvant provenir de l'emploi d'un collecteur ordinaire, on fit les essais avec une bague lisse; le dispositif expérimental fut le suivant. Le courant traversait un interrupteur, un ampèremètre, le balai à étudier, la bague, le second balai et une résistance de réglage. Suivant que les deux balais frottaient sur la même surface de la bague ou sur des surfaces différentes, la résistance de passage présentait des valeurs différentes. On mesurait la différence de potentiel entre la bague et le balai au moyen d'un voltmètre de Siemens et Halske à suspension filiforme. La résistance intérieure de cet appareil était de 308 ohms ; une résistance de 30 000 ohms était placée en série avec lui pour ramener la déviation dans les limites de l'échelle. L'appareil et la résistance étaient fréquemment étalonnés. La liaison entre le voltmètre et la bague était assurée au moyen d'un contact à mercure constitué par une pointe d'acier vissée dans l'arbre et trempant dans un tube de laiton rempli de mercure. Le voltmètre était relié à ce tube d'une part et au balai à étudier d'autre part. Au début des expériences on trouvait, pour la même sorte de charbon et pour la même densité de courant différentes valeurs, ce qui provenait d'une vibration des porte-balais et de la machine. Des courbes relevées à l'oscillographe montrèrent nettement l'influence de ces vibrations, dont on modifiait à volonté la fréquence en plaçant sur les porte-balais un poids mobile. Suivant l'importance de ces oscillations, il se produisait sous le balai des étincelles. Pour une position convenable du poids mobile, on pouvait observer des phénomènes de résonance :

le balai vibrait alors énormément et la formation d'étincelles était considérable. Pour amortir ces vibrations, on plaça du caoutchouc sous les ressorts des porte-balais.

Les expériences faites sur différentes sortes de balais ont donné les résultats suivants :

1° Balais cuivre-charbon système Endruweit. — Ces balais contiennent un grand nombre de feuilles entièrement minces en cuivre chimiquement pur augmentant la conductibilité du balai dans le sens longitudinal. La résistance ohmique est environ 5 fois plus grande dans le sens transversal que dans le sens longitudinal. Les différences de potentiel de passage e sont relativement faibles pour des densités de courant s normales, et n'ont pas dépassé 0,6 volt pour les deux balais ensemble. La bague, qui tournait avec une vitesse périphérique de $5^m,5$ par seconde environ, présentait après l'essai une coloration noir-brun. La caractéristique $e=f(s)$ pour le sens de courant métal-charbon est située au-dessus de la caractéristique pour le sens inverse du courant.

2° Balais métalliques Endruweit. — Ces balais sont formés de feuilles métalliques préparées galvaniquement, entre lesquelles est placé du charbon préparé servant à diminuer l'usure du collecteur. Pour une pression d'environ 200 grammes par centimètre carré, on a trouvé une différence de potentiel maxima de 0,5 volt pour les deux balais ensemble. La caractéristique pour le sens du courant balai-bague est située au-dessus de la caractéristique relative au sens opposé.

3° Balais Ringsdorff R.III. — Des bandes de cuivre ou de laiton incorporées réduisent la résistance longitudinale qui est 12 fois moins élevée que la résistance transversale. Les différences de potentiel de passage n'ont pas dépassé 0,4 volt pour les deux balais ensemble. La chute de tension charbon-métal est plus grande que la chute de tension métal-charbon.

4° Balais en morganite. — Ces balais sont très mous et ne doivent pas être employés à plus de 8 ampères par centimètre carré. La chute de tension pour les deux balais ensemble atteint 1 volt. Un autre type de balais en morganite, établi pour des densités de courant atteignant 16 ampères par centimètre carré a donné une chute de tension de 1,13 volt. Avec les deux types de balais, la bague s'est recouverte d'une couche de charbon brun foncé.

5° Charbons au bronze de la Svenska Dynamoborstfabrik. — Ces balais sont formés d'un mélange de bronze et de charbon. La différence de potentiel de passage ne dépasse pas 0,4 volt pour les deux balais.

6° Balais de la Société Le Carbone ; sorte X. — La différence de potentiel de passage présentée par ces balais est de 0,9 volt environ et est plus grande pour le sens charbon-métal. Il semble que la température et l'humidité de l'air environnant exercent une grande influence sur les résultats des mesures.

On peut ajouter aux résultats de ces mesures les observations suivantes.

Dans les machines munies de roulements à billes, il y a lieu d'employer des ressorts puissants, c'est-à-dire présentant une période longue d'oscillations, car les paliers à billes donnent lieu à des vibrations de fréquence élevée.

Le passage de courant est accompagné d'un phénomène électrolytique. La bague métallique est recouverte d'une mince couche d'eau que décompose le passage du courant. Quand celui-ci passe du métal au charbon, l'oxygène de l'eau décomposée apparaît au métal, y produit une oxydation et, par suite, abaisse la différence de potentiel de passage. Il est surprenant que cet abaissement de la différence de potentiel de passage n'ait été observé que sur une partie des types de balais essayés et soit inverse pour d'autres types. Ce phénomène doit évidemment être attribué au coefficient de température du charbon et à d'autres influences.

B. L.

***Moteur-série monophasé Siemens-Schuckert.* — R. Richter.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 7 et 14 juin 1906.

Dans une étude précédente (1) sur le démarrage des moteurs monophasés à collecteur, l'auteur a montré que le courant de court-circuit des bobines de l'induit court-circuitées par les balais décale le courant du moteur par rapport au flux d'excitation, d'où résulte, pour un couple donné, une augmentation de la valeur du courant moteur. Les courants d'intensité élevée qui prennent naissance sous les balais échauffent le collecteur, produisent des étincelles aux balais

(1) Voir *Éclairage Électrique*, tome XLVI, 24 mars 1906, p. 464.

et augmentent les pertes à un tel point que, si l'on n'emploie pas un artifice particulier, le démarrage avec un transformateur subdivisé peut absorber plus de puissance que le démarrage sur courant continu avec des résistances. Il existe différents moyens permettant d'améliorer le démarrage du moteur monophasé, mais un seul d'entre eux est d'une efficacité complète : c'est l'emploi de jonctions résistantes entre le collecteur et les conducteurs induits. Les moteurs Siemens-Schuckert en sont munis depuis longtemps, même pour les faibles fréquences, de 16 périodes par exemple, et présentent, grâce à cet artifice, un bon démarrage. Il n'est pas facile de placer ces résistances d'une façon qui présente toute sécurité de fonctionnement, sans augmenter la longueur du moteur. La meilleure solution est celle employée depuis longtemps par Ganz et C[ie], et consistant à placer les jonctions résistantes dans le fond des encoches. Si les conditions que doit remplir le moteur au démarrage ne sont pas très dures, on peut employer des bandes résistantes placées entre le collecteur et l'enroulement. Pour augmenter la capacité calorifique et la surface de refroidissement de ces bandes, on peut les ajourer par des fentes transversales. La bobine de self-induction parallèle à l'enroulement excitateur, et dont il a été question dans l'étude précédente, est employée assez rarement dans les moteurs Siemens-Schuckert, car ce dispositif ne permet pas de réduire l'échauffement du collecteur autant que l'emploi de jonctions résistantes.

Dans le cas où les conditions de démarrage sont dures, les moteurs Siemens-Schuckert sont munis de jonctions résistantes placées dans les encoches de l'induit, comme dans les moteurs Ganz ou Westinghouse. Mais, dans le nouveau dispositif Siemens-Schuckert, les conducteurs de jonction ne servent pas seulement à élever la résistance du circuit en court-circuit sous les balais, mais forment un enroulement induit ouvert relié en série avec l'enroulement principal et élèvent ainsi la puissance et le rendement du moteur. La figure 1 indique le principe du nouveau dispositif. Les lignes en trait plein représentent une partie d'un enroulement induit fermé ordinaire, que l'auteur désigne dans la suite sous le nom d'enroulement principal. Sur la figure, elle est représentée comme enroulement imbriqué d'un moteur bipolaire (avec le plus grand pas du côté du collecteur). La bobine $a — x — b$, figurée en pointillé, de l'enroulement principal est directement en court-circuit : les points a et b doivent donc être reliés aux lames du collecteur qui, à l'instant considéré, se trouvent sous les balais. Les jonctions forment un enroulement ouvert en série avec l'enroulement principal : l'auteur le désigne dans la suite sous le nom d'enroulement supplémentaire, et il est représenté en traits-points sur la figure 1. Le courant

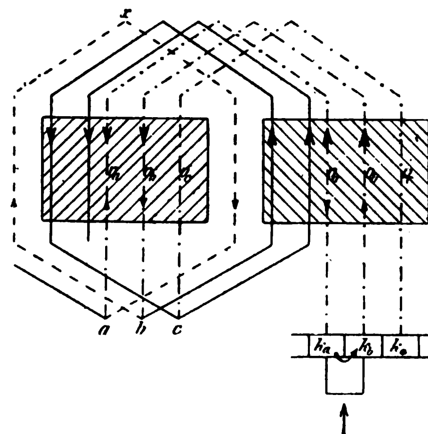


Fig. 1.

du moteur passe du balai positif par les lames k_a et k_b à travers les portions v_a et v_b en parallèle de l'enroulement supplémentaire jusqu'aux points a et b, et, de là, circule dans les branches en parallèle de l'enroulement principal : ensuite, il atteint les balais négatifs en passant par une autre portion semblable de l'enroulement auxiliaire. Les flèches figurées sur le schéma indiquent la direction dans laquelle il circule. L'enroulement supplémentaire est disposé dans les encoches de l'induit de telle façon que la portion parcourue par le courant exerce, avec le flux d'excitation, un couple qui s'ajoute à celui dû à l'enroulement principal : les conducteurs de jonction entre l'enroulement principal et le collecteur sont donc actifs.

L'auteur étudie le courant de court-circuit produit par la f. é. m. induite statiquement dans la bobine court-circuitée. Le sens de ce courant est indiqué sur la figure 1 par de petites flèches : celui-ci passe du point a par la bobine v_a, la lame de collecteur k_a, le balai, la lame de collecteur k_b, la bobine v_b, le point b, la bobine $b — x — a$ et le point a. Le courant de court-circuit est affaibli par la résistance de la bobine sup-

plémentaire en circuit et la réaction des bobines court-circuitées de l'enroulement principal est réduite autant qu'on le veut, suivant la résistance des bobines supplémentaires. L'enroulement supplémentaire n'influe pas sur le flux d'excitation car son axe est dans la zone neutre. Les bobines supplémentaires présentent un enroulement bifilaire pour le circuit en court-circuit et il n'y a, par suite, pas d'effet d'induction. Si la dispersion d'une bobine supplémentaire n'était pas négligeable, cela ne serait que favorable pour le démarrage: en marche normale au contraire, il se produirait une f. é. m., en phase avec la tension de commutation, que l'on pourrait compenser facilement au moyen d'un enroulement de pôle de commutation en série avec l'induit, de même que dans les machines à courant continu.

Les jonctions parcourues par le courant du moteur formant des conducteurs induits actifs, il est bon de les constituer non par du métal de résistance spécifique élevée, mais par du cuivre : la longueur de ces conducteurs doit alors être augmentée et leur section réduite. Le nombre de conducteurs de l'enroulement supplémentaire augmente comme la racine carrée du rapport des conductibilités électriques des métaux. Le rapport des conductibilités du fer et de la Kruppine par exemple étant dans le rapport de 55/1, le nombre de conducteurs de l'enroulement supplémentaire doit être de 7,4 fois plus grand quand on emploie du cuivre: le gain réalisé sur le couple est donc 7,4 fois plus considérable.

Soit L la puissance utile du moteur sans enroulement supplémentaire, L_1 la puissance absorbée: le rendement du moteur est:

$$\eta = L/L_1 = \eta L_1/L_1.$$

Les pertes dans le moteur sont données par la formule : $v = (1 - \eta) L_1$.

Soit u le rapport des nombres des ampère-conducteurs actifs de l'enroulement supplémentaire et de l'enroulement principal: si l'on suppose à peu près la même induction magnétique en tous les points sous les pôles, la puissance utile du moteur avec l'enroulement supplémentaire est donnée par l'expression suivante:

$$L' = (1 + u) L = (1 + u) \eta L_1. \qquad (1)$$

La puissance absorbée est donnée par la formule:

$$L'_1 = (1 + u) \eta L_1 + v = (1 + u\eta) L_1, \qquad (2)$$

car les pertes v restent les mêmes, la résistance d'une bobine supplémentaire étant la même que celle des jonctions résistantes entre l'enroulement et le collecteur dans le moteur non muni d'enroulement supplémentaire.

Le rapport des puissances est donc, d'après cela:

$$L'/L = 1 + u \qquad (1_a)$$

et le rapport des rendements est donné par la formule:

$$\eta'/\eta (1 + u)/(1 + \eta u) \text{ ou app}^t\ 1 + u (1 - \eta). \qquad (2_a)$$

Pour $\eta = 0,8$ et $u = 0,1$ on a $L' = 1,1L$ et $\eta' = 0,815$. La puissance utile est élevée de 10 °/₀ et le rendement de 1,5 °/₀. Pour des moteurs à couple de démarrage particulièrement élevé, et, par suite, à résistance relativement élevée entre l'enroulement et le collecteur, on peut atteindre facilement pour u la valeur 0,2. La puissance du moteur croît, grâce à l'emploi de l'enroulement supplémentaire, de 20 °/₀ par rapport aux moteurs munis de jonctions résistantes ordinaires, et le rendement est amélioré de 3 °/₀.

Si l'induction n'a pas à peu près la même valeur en tous les points sous les pôles, le gain est encore plus important quand l'enroulement auxiliaire est disposé de telle façon que la partie traversée par le courant soit au point où l'induction a la plus grande valeur. Par exemple, pour un enroulement excitateur uniformément réparti, la répartition de l'induction sous les pôles affecte une forme triangulaire (si l'on néglige la réluctance du fer); on doit disposer, dans ce cas, l'enroulement supplémentaire de telle façon que la partie parcourue par le courant soit au milieu du pôle. Pour u, on doit poser alors $u' = 1,5u$.

L'auteur indique quelques dispositions particulières de l'enroulement supplémentaire. La figure 1 représente le schéma de l'enroulement supplémentaire pour le cas où l'enroulement principal est imbriqué et présente le plus grand pas du côté du collecteur: pour un enroulement imbriqué avec le plus petit pas du côté du collecteur les extrémités des bobines supplémentaires doivent être échangées (fig. 2). Dans le cas d'un enroulement principal ondulé, on établit de la même manière l'enroulement auxiliaire qui peut, dans l'un et l'autre cas, être soit imbriqué, soit ondulé.

L'auteur étudie de combien l'on peut augmen-

ter la puissance du moteur par l'emploi de l'enroulement supplémentaire sans que la tension de commutation atteigne une valeur trop élevée.

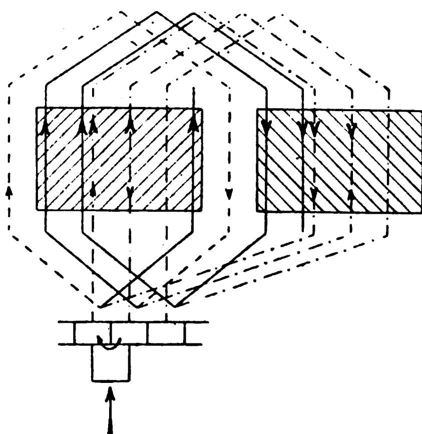


Fig. 2.

Pour cela, il est avantageux de déterminer le rapport de la tension de commutation d'une bobine auxiliaire à la tension de commutation d'une bobine principale. Soient U la vitesse de rotation du moteur, k le nombre de lames du collecteur, β le rapport de la largeur des balais au pas du collecteur.

Pour l'enroulement principal, la fréquence de la commutation est $1/2\,(\mathrm{U}k/\beta)$ et la tension de commutation est :

$$e = c\frac{\mathrm{U}k}{2}s^2\frac{\mathrm{J}}{2p} \qquad (3)$$

en désignant par c une constante qui dépend surtout de la forme des encoches, par $s = z/2k$ le nombre des tours de l'induit entre deux lames successives dans le schéma d'enroulement, par J le courant moteur efficace, par $2p$ le nombre de pôles du moteur.

En remplaçant s par sa valeur, on obtient l'expression :

$$e = c\frac{\mathrm{U}k}{2}\cdot\frac{\mathrm{J}}{2p}\cdot\frac{z^2}{4k^2} = \frac{c}{16}\cdot\frac{\mathrm{U}}{k}\cdot z^2\cdot\frac{\mathrm{J}}{p}. \qquad (4)$$

La fréquence de la commutation des bobines supplémentaires est $1/4\,\mathrm{U}k$. Avec la disposition adoptée pour l'enroulement auxiliaire, on a comme valeur du facteur c des formules 3 et 4 pour le calcul de la tension de commutation de l'enroulement auxiliaire : $c' = c/2$. Le plus grand courant efficace passant dans une bobine auxiliaire est $\mathrm{J}/p\beta$, puisque $p\beta$ bobines auxiliaires sont parcourues en parallèle par le courant. Si l'on désigne par s' le nombre de tours d'une bobine auxiliaire, on obtient pour la tension de commutation d'une bobine auxiliaire

$$e' = \frac{c}{2}\frac{\mathrm{U}k}{4}s'^2\frac{\mathrm{J}}{p\beta}. \qquad (5)$$

Le produit du courant moteur et du nombre de conducteurs actifs de l'enroulement supplémentaire est J. $4s'$, car $p\beta$ bobines auxiliaires sont parcourues en parallèle par le courant et que les bobines auxiliaires sont en série deux par deux. Ce produit, pour l'enroulement principal dans un moteur avec induction uniformément répartie sous les pôles est J $(z/2p)\gamma$, en appelant γ le rapport de l'arc polaire au pas polaire. Si l'on introduit encore le rapport

$$\frac{\text{nombre d'ampère-conducteurs actifs de l'enroulement auxiliaire}}{\text{nombre d'ampère-conducteurs actifs de l'enroulement principal}}$$

égal à
$$u = \frac{4s'}{(z/2p)\gamma},$$

l'équation (5) se transforme en l'équation suivante :

$$e' = \frac{c}{2}\frac{\mathrm{U}k}{4}\frac{1}{16}u^2\gamma^2\frac{z^2}{4p^2}\frac{\mathrm{J}}{p\beta}$$
$$= \frac{c}{512}\frac{\mathrm{U}k}{\beta}z^2\frac{\mathrm{J}}{p^3}u^2\gamma^2. \qquad (6)$$

Des équations 4 et 6, on tire la valeur du rapport

$$\frac{e'}{e} = \frac{u^2\gamma^2}{32}\frac{k^2}{\beta p^2}. \qquad (7)$$

Si l'enroulement supplémentaire doit augmenter, par exemple, le couple de 10 °/₀, on a $u = 0{,}1$: si l'on pose $\gamma = 0{,}85$, il vient :

$$\frac{e'}{e} = \frac{1}{4400}\frac{k^2}{\beta p^2}. \qquad (8)$$

On obtient la même relation si l'enroulement principal est ondulé avec $2p$ lignes de balais. Le nombre de pôles $2p$ est relativement grand dans les moteurs construits par la Société Siemens-Schuckert, même pour de faibles puissances (3 chevaux), de sorte que la tension de commutation de l'enroulement supplémentaire est sensiblement plus faible que celle de l'enroulement principal.

Par exemple, pour un moteur avec $\gamma = 0{,}62$ et $\beta = 2$ approximativement, et pour un enroulement auxiliaire tel que le couple soit augmenté de 10 °/₀ (¹) :

$$\frac{e'}{e} = \frac{0{,}1^2 \cdot 0{,}62^2 \cdot 115^2}{32 \cdot 2 \cdot 3^2} = 0{,}008.$$

(¹) $u = 0{,}1$, ce qui correspond à un nombre de tours de chaque bobine auxiliaire de $\frac{(z/2)\gamma u}{4} = \frac{115 \cdot 0{,}62 \cdot 0{,}1}{4} = 1{,}78$, ou approximativement 2.

On voit donc que, au point de vue de la tension de commutation, on peut sans aucun inconvénient augmenter la puissance du moteur de 10 °/₀ par l'emploi de l'enroulement auxiliaire et que cette valeur peut être sensiblement dépassée, quand, au point de vue du couple, on adopte des valeurs élevées pour les résistances de jonction entre l'enroulement et le collecteur.

Deux moteurs identiques de 10 chevaux à 6 pôles, 1 440 tours par minute et 50 périodes furent établis l'un avec un induit muni de l'enroulement supplémentaire, l'autre avec un induit muni seulement de jonctions résistantes ordinaires. Pour éliminer, dans les résultats comparatifs, toute erreur due à un défaut de construction du stator, on échangeait, pendant les expériences, les deux induits l'un avec l'autre. L'enroulement auxiliaire consistait en bobines contenant chacune cinq tours de fil de cuivre : le rapport des conducteurs actifs de l'enroulement auxiliaire à ceux de l'enroulement principal était $u = 0,16$. Au frein, on trouva que le moteur ordinaire à jonctions résistantes possédait un rendement de 74 °/₀. Le rendement du moteur à enroulement auxiliaire devait donc être de

$$\frac{1 + 0,16}{1 + 0,16 \cdot 0,74} \cdot 0,74 = 76,9\ °/_0.$$

En fait, on trouva expérimentalement un rendement de 77 °/₀. L'induit du moteur à enroulement auxiliaire absorbait 10 °/₀ de courant en moins au démarrage pour un même couple.

Dans le moteur série monophasé Siemens-Schuckert, on emploie, pour le démarrage et le réglage de la vitesse, un transformateur à rapport variable.

(A suivre.) R. V.

Sur le courant d'excitation des moteurs d'induction. — **Mac Allister.** — *The Electrician*, 8 juin 1906.

Dans la prédétermination du fonctionnement d'un moteur d'induction, il est essentiel que la valeur du courant à vide au synchronisme et ses deux composantes, wattée et déwattée, soient connues avec une grande exactitude. La composante wattée du courant à vide est déterminée d'après les pertes constantes de la machine, comprenant les frottements, la résistance de l'air, les pertes dans le fer et une faible partie des pertes dans le cuivre primaire. Les pertes par frottement et par résistance de l'air peuvent être évaluées d'après les dimensions mécaniques, et les pertes dans le cuivre peuvent être facilement déterminées : au contraire, on éprouve une certaine difficulté dans le calcul des pertes dans le fer quand la distribution du magnétisme et le volume des différentes parties du noyau ne sont pas exactement connus. La méthode ordinairement employée pour la détermination de la composante déwattée du courant à vide, ou courant d'excitation, exige que l'on connaisse la longueur et la section droite de chaque circuit magnétique, l'induction dans chacun de ces circuits et la disposition mécanique des bobines dans lesquelles le courant doit passer pour produire la force magnétomotrice nécessaire. Le calcul de la composante déwattée est ainsi beaucoup plus laborieux que le calcul de la composante wattée. L'auteur attire l'attention sur le fait que la valeur de la composante déwattée peut être déterminée directement d'après le volume de l'entrefer et le volume du noyau, sans qu'il soit nécessaire de connaître la force magnétomotrice ainsi que le nombre ou la distribution des bobines primaires.

Soit A la section d'un certain circuit magnétique en centimètres carrés, l la longueur de ce circuit en centimètres, μ la perméabilité du fer, d la longueur de l'entrefer en centimètres, n le nombre de tours d'une bobine agissant sur ce circuit, E la valeur efficace de la différence de potentiel agissante, Φ la valeur du flux, i la valeur du courant d'excitation en ampères, I_q la valeur efficace du courant d'excitation, Φ_m la valeur maxima du flux. On a la relation

$$\Phi = \frac{4\pi ni}{10} \cdot \frac{A}{d + (l/\mu)}. \qquad (1)$$

La reluctance n'est pas constante et dépend de l'induction : le courant d'excitation n'est pas sinusoïdal par suite de la présence de fer. Quand la majeure portion de la réluctance du circuit considéré est de l'air, l'effet de la distorsion produite par la présence de la reluctance variable du fer n'est pas très marqué en général, et peut être négligé en pratique. Si la valeur maxima du courant d'excitation est i_m, la valeur efficace est un peu différente de $i_m/\sqrt{2}$, mais, puisque la valeur de i_m ne peut pas être prédéterminée avec une grande exactitude, à cause de l'incertitude sur la valeur de μ, on commet une

erreur négligeable en représentant la valeur efficace du courant d'excitation par l'équation

$$I_q = i_m / \sqrt{2}. \qquad (2)$$

On a :

$$\Phi_m = \frac{4\pi}{10} \cdot \sqrt{2} I_q n \frac{A}{d + (l/\mu)} \qquad (3)$$

ou

$$I_q = \frac{10 \Phi_m [d + (l/\mu)]}{4\pi \sqrt{2} n A} \qquad (4)$$

et

$$E = \frac{\sqrt{2} \pi n f \Phi_m}{10^8}. \qquad (5)$$

La puissance magnétisante est donnée par la formule :

$$W_q = EI_q = \frac{2{,}5 f}{10^8} \cdot \frac{\Phi_m^2}{A} \left(d + \frac{l}{\mu}\right). \qquad (6)$$

Soit $V_i = Al$ le volume du fer en centimètres cubes et $V_a = Ad$ le volume de l'air en centimètres cubes.

On a :

$$\frac{\Phi_m^2}{A}\left(d + \frac{l}{\mu}\right) = \frac{\Phi_m^2}{A}\left(dA + \frac{lA}{\mu}\right) = B_m^2\left(V_a + \frac{V_i}{\mu}\right) \qquad (7)$$

et

$$W_q = \frac{2{,}5 f}{10^8} B_m^2 \left(V_a + \frac{V_i}{\mu}\right), \qquad (8)$$

en appelant B_m l'induction maxima.

On voit d'après l'équation (8), que pour pouvoir déterminer la puissance magnétisante, il est nécessaire de connaître seulement l'induction maxima, le volume et la perméabilité du fer et le volume de l'entrefer. Les grandeurs qu'il est nécessaire de connaître pour déterminer les pertes dans le noyau suffisent donc en même temps pour déterminer la puissance magnétisante, quand on connaît la perméabilité du noyau.

En ce qui concerne la valeur de cette perméabilité, l'expérience a montré que, pour le fer employé dans les transformateurs et dans les moteurs d'induction, elle est donnée avec une exactitude suffisante, pour l'intervalle compris entre $B_m = 0$ et $B_m = 15\,000$, par l'expression :

$$\mu = 2\,800 - 3{,}2 \left(\frac{7\,500 - B_m}{10^5}\right)^2.$$

L'équation (8) établie dans le cas d'un circuit magnétique simple s'applique encore au cas d'un circuit magnétique complexe tel que ceux des moteurs monophasés et polyphasés. On peut montrer théoriquement et vérifier expérimentalement que la puissance magnétisante d'un moteur polyphasé donné ont la même valeur quand tous les enroulements sont employés, ou quand un seul enroulement est soumis à la différence de potentiel primaire. Ainsi quand on coupe le circuit d'une des phases d'un moteur diphasé, l'autre enroulement prend immédiatement un courant magnétisant de valeur double, la puissance magnétisante conservant la même valeur. Il semble donc que la méthode la plus logique pour calculer le courant d'excitation d'un moteur d'induction soit de déterminer l'induction dans le noyau et dans l'entrefer et de calculer la puissance magnétisante.

R. R.

OSCILLATIONS HERTZIENNES & TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

Sur la télégraphie sans fil. — **R. A. Fessenden.** — *Electrical Review*, 11 et 18 mai 1906.

L'auteur fait un historique rapide des progrès réalisés en télégraphie sans fil depuis 1896 et rappelle l'emploi des galvanomètres, des bolomètres et des appareils électrolytiques comme détecteurs d'ondes. Les expériences faites depuis cette époque et les communications assurées récemment à des distances de 4 800 kilomètres ont montré que l'intensité des ondes reçues diminue d'une façon inversement proportionnelle au carré de la distance. Les pertes d'énergie, ou l'absorption, dépendent non pas de phénomènes en jeu au voisinage des postes de télégraphie sans fil, mais de l'action de l'air compris entre les postes. Il est exact que le capitaine Wildmann ait trouvé, dans ses expériences, que les pertes varient avec l'état d'humidité existant au voisinage des postes, mais cela provient sans doute du fait que les stations étaient très proches l'une de l'autre, environ 160 kilomètres, de sorte que le degré d'humidité était le même au voisinage des postes et entre ceux-ci. Dans les expériences transatlantiques faites par l'auteur entre Boston et Machrihanish, on a trouvé que les intensités des signaux reçus par l'une ou l'autre station étaient identiques dans une même nuit. Au cours d'un grand nombre d'observations faites au cours de l'hiver, dans 96 °/₀ des expériences l'intensité des ondes reçues à Machrihanish depuis Boston a été identique à celle des ondes reçues à Boston de Machrihanisch. Outre les postes de Boston et de Machrihanish, des expérimentateurs étaient placés aux points suivants : à une villa appartenant à la

compagnie, à Lynn, à Schenectady, à Philadelphie et à Washington, à des distances de Boston de 200 mètres, 48 kilomètres, 272 kilomètres, 400 kilomètres et 600 kilomètres. Le poste de Machrihanish est situé à une distance de 4 806 kilomètres de celui de Boston. Les intensités étaient déterminées par la mesure des intensités de certains signaux que l'expérience avait montré les meilleurs pour l'obtention de résultats quantitatifs. Les résultats de ces expériences montrent que l'absorption ne se produit pas au voisinage des postes. Pour la comparaison, on doit se limiter exclusivement aux résultats obtenus la nuit, car l'influence du soleil est très importante et elle varie beaucoup. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

POSTE	DISTANCE	INTENSITÉ DES SIGNAUX reçus dans LES PLUS MAUVAISES NUITS (l'intensité des signaux sans absorption étant prise égale à 1 000).
Villa de la compagnie.	200 m.	1 000
Lynn.	48 km.	1 000
Schenectady.	272 —	500
Philadelphie.	400 —	300
Washington.	640 —	150
Machrihanish.	4 806 —	1

On voit que l'absorption augmente comme une puissance élevée de la distance, au moins au delà d'une certaine distance. Il semble qu'après quelques milliers de kilomètres l'absorption soit constante. Certaines nuits, on recevait au poste de Boston un double groupe d'impulsions dont le second était décalé d'environ un cinquième de seconde sur le premier. Il semble que ce second groupe de signaux arrivait au poste après avoir suivi le chemin le plus long autour de la terre. Pour donner un exemple numérique, l'auteur indique que, dans la nuit du 30 janvier, l'intensité des signaux reçus à Boston et venant de Machrihanisch était 480 fois plus grande que l'intensité minima nécessaire pour une audition nette. Si le second groupe de signaux parvient après avoir suivi le chemin le plus long, les intensités, d'après la loi du carré de la distance, doivent être dans le rapport de $4,8^2/40^2$ ou comme $1/70$. L'intensité de ces signaux doit donc être 480/70 ou 7 fois l'intensité minima d'audition. En fait, le second groupe de signaux, que l'auteur appelle l'écho, avait le double de cette intensité. Il est donc probable que le régime d'absorption devient uniforme à partir d'une certaine distance.

L'auteur publie une courbe indiquant les intensités des signaux entre Boston et Machrihanish dans les différentes nuits du mois de janvier. Sur cette courbe, on constate l'existence de différences très considérables. Dans la nuit du 30 janvier, l'intensité des signaux reçus a été mille fois plus considérable environ que dans les nuits des 13, 18 et 31 janvier. Dans cette nuit du 30 janvier, l'intensité des signaux a correspondu exactement avec celle que l'on déduit de considérations théoriques. La puissance mise en jeu dans ces expériences du mois de janvier était de 4 chevaux : dans beaucoup de cas, on a pu échanger des messages avec une puissance d'un cheval seulement. Pour pouvoir transmettre des signaux de grande intensité, on établit en ce moment à Boston et à Machrihanish des postes de 50 chevaux environ ; en outre, on emploiera un nouveau détecteur qui est à peu près dix fois plus sensible que le détecteur électrolytique.

L'auteur a vérifié que la longueur des ondes n'est pas modifiée aux longues distances. Il a employé pour cela un ondomètre à inductance variable analogue à un rhéostat de Varley-Thomson ; l'inductance variable était formée d'un tube de cuivre pur portant, enroulé sur lui, un fil isolé ; le tube agissait comme le secondaire d'un transformateur en court-circuit. Les longueurs d'ondes ont été trouvées égales au poste transmetteur et au poste récepteur, à 0,3 °/₀ près.

L'auteur a étudié l' « absorption éolotropique ». Il a trouvé que l'absorption varie dans différentes directions à différentes nuits, et en conclut qu'il doit se produire des effets de diffraction. Il semble que les masses absorbantes ne soient pas continues, mais soient, en quelque sorte, analogues à des nuages transparents dont la dimension et l'emplacement varient considérablement. L'auteur cite les résultats d'expérience obtenus dans des postes de son système établis sur le fleuve de l'Amazone, à 240 kilomètres l'un de l'autre. Les signaux avaient, pendant la nuit, une intensité égale à 20 fois l'intensité minima : 15 minutes après le lever du soleil, il était impossible de les percevoir. Les postes ont dû être modifiés de façon à émettre des signaux plus puissants pour permettre les communications

de jour. Dans ces pays tropicaux, l'action du soleil est très importante ; entre Boston et Machrihanish, la différence entre les résultats de jour et de nuit ont présenté des différences beaucoup moins grandes que les résultats de bonnes et de mauvaises nuits. On peut dire que le plus mauvais jour n'est pas beaucoup plus mauvais que la plus mauvaise nuit, tandis que le meilleur jour est beaucoup plus mauvais que la meilleure nuit. Des expériences très complètes faites entre Boston et Washington (640 kilomètres) ont donné les mêmes résultats.

Les indications qui précèdent peuvent être résumées de la façon suivante :

1° Il existe dans l'atmosphère supérieure de larges masses absorbantes, probablement constituées par de l'air ionisé. A proximité de la surface, ces masses ne sont pas continues, mais sont analogues à des nuages dont les dimensions diminuent quand on approche du sol.

2° Dans les climats tempérés, les ondes émises n'atteignent par la hauteur de ces masses absorbantes et ne sont pas absorbées d'une façon appréciable pour des distances de 160 kilomètres environ.

3° Au delà de cette distance, les ondes atteignent les masses absorbantes et sont absorbées. L'absorption augmente plus que proportionnellement à la puissance première de la distance. Au delà de quelques milliers de kilomètres, il est possible que le régime d'absorption soit constant.

4° Pour de longues distances, l'absorption est très considérable : plus de 99,9 °/₀ de l'énergie est absorbée.

5° L'action de la lumière solaire fait que la hauteur à laquelle l'absorption se produit est considérablement réduite.

6° La lumière solaire agit en modifiant l'air d'une façon quelconque, probablement en l'ionisant. Ce fait est mis en évidence par la diminution rapide de l'intensité des signaux aussitôt après le lever du soleil. Dans les pays tropicaux, au bout de 15 minutes l'ionisation est suffisante pour produire l'absorption.

7° Dans les pays tropicaux la hauteur d'absorption est beaucoup plus faible que dans les climats tempérés.

8° L'absorption doit être plus grande dans une direction que dans une autre.

9° Dans les zones tempérées, il y a une différence considérable entre l'absorption la nuit et le jour. Pour les distances comprises entre 500 et 1 600 kilomètres, il y a une différence considérable entre l'absorption pendant la nuit et l'absorption pendant le jour. Pour les distances inférieures à 1 600 kilomètres, la différence est moins grande.

Ce fait semble indiquer que l'action de la lumière solaire est d'abaisser le niveau pour lequel l'absorption commence.

10° La hauteur au-dessus du sol à laquelle l'absorption commence à se produire peut être grossièrement évaluée à 480 kilomètres la nuit et 160 kilomètres le jour, pour les zones tempérées, et à 160 kilomètres la nuit et 48 kilomètres le jour pour la zone tropicale.

En ce qui concerne les postes de l'Amazone, l'auteur indique que ceux-ci avaient été commandés pour une distance de 160 kilomètres à franchir, alors qu'en réalité la distance comprise entre les deux points où ils ont été élevés est de 250 kilomètres environ. Il a donc fallu modifier un peu les installations pour atteindre cette distance, mais, depuis lors, le fonctionnement est tout à fait satisfaisant. Les appareils primitivement envoyés (pour 160 kilomètres) ont permis de communiquer, en Amérique, à des distances de 960 kilomètres dans des circonstances favorables. On a même pu assurer, avec eux, des communications à 1 650 kilomètres entre le cap Hatteras (avec une antenne de 23 mètres de hauteur et un transformateur de un quart de cheval) et un poste des Indes Orientales (équipé avec une antenne de 53 mètres et une puissance de 2 kilowatts). Dans des circonstances favorables, le jour, avec des antennes de 40 mètres de hauteur, on a pu communiquer sans difficulté à 160 kilomètres avec une dépense d'énergie de 5 watts.

L'auteur termine en indiquant quelques installations faites avec son système et fonctionnant commercialement depuis quelques années : Bermuda-New-York (depuis 1902), Cuba-Etats-Unis, Amazone, Écosse États-Unis, etc. Des permissions ont été demandées aux gouvernements français et espagnol pour l'établissement de communications entre ces pays et les États-Unis, mais elles n'ont pas été accordées jusqu'à présent. Les expériences faites entre les États-Unis et l'Écosse (Boston-Machrihanish) montrent d'une façon péremptoire que ces communications sont réalisables. R. V.

TÉLÉGRAPHIE & TÉLÉPHONIE

Relais téléphonique. — **J. Trowbridge.** — *Electrical Review (New-York)*, 19 mai 1906.

L'auteur a réalisé un relais téléphonique établi sur les mêmes principes généraux que le recorder télégraphique de Lord Kelvin : un contact microphonique est relié à une pièce mobile en fer dont la position dans un champ magnétique est modifiée par les variations du champ magnétique environnant, produites par les courants téléphoniques. La seule connexion mécanique est celle du contact microphonique avec la pièce mobile. Le relais consiste en une petite bobine mobile avec un noyau feuilleté en équilibre dans un champ magnétique : les courants téléphoniques à répéter parcourent la petite bobine mobile et modifient l'équilibre magnétique dans le champ magnétique. La figure 1 représente schématiquement l'appareil : NS sont les pôles du champ magnétique, C la bobine mobile actionnée par les courants téléphoniques à répéter, A et B des diaphragmes de support, DE le support des contacts microphoniques ou le transmetteur. Celui-ci peut être un disque épais : dans quelques expériences l'auteur a employé un disque en laiton de 12 millimètres d'épaisseur. La portion centrale du diaphragme A est indépendante de la pression sur le transmetteur T. La transmission des vibrations de ce diaphragme A est assurée au moyen d'un support transmettant les sons. L'air enfermé dans la chambre DE prend une très faible part à la transmission des vibrations du diaphragme A.

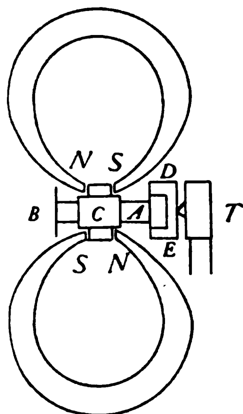


Fig. 1.

R. R.

Sur l'extension des réseaux téléphoniques en Allemagne. — *Elektrotechnik und Maschinenbau*, 3 juin 1906.

Les chiffres qui suivent permettent de se rendre compte du développement de la téléphonie en Allemagne. A la fin de l'année 1905 le nombre de localités reliées au réseau téléphonique étaient de 4 062, au lieu de 3 770 à la fin de 1904. Le nombre total des postes était de

	POSTES téléphoniques	LIGNES en fonctionnement	NOMBRE de communications par jour.
Berlin	74 836	196 678	578 422
Hambourg	31 707	65 055	271 598
Francfort	14 104	41 949	108 179
Leipzig	13 159	69 301	62 668
Dresde	12 917	51 619	65 889
Cologne	11 163	45 737	69 299
Breslau	9 364	19 784	66 666

	LIGNES doubles (km.)	NOMBRE de communications par jour.	REMARQUES
Berlin — Paris (848 km en Allemagne)	1 192	53	
Berlin — Posen — Bromberg — Elbing — Königsberg (Pr.) — Intersburg — Tilsit — Memel	944	229	
Berlin — Budapest (513 km. en Allemagne)	941	9	
Berlin — Stuttgart — Bâle (417 km. en Allemagne)	914	86	
Berlin — Osterode — Königsberg (Pr.)	709	140	
Berlin — Vienne (252 km. en Allemagne)	686	113	
Berlin — Dresde — Prague — Vienne (252 km. en Allemagne)	676	127	
Berlin — Nuremberg — Munich	665	68	
Berlin — Munich	662	120	2 lignes.
Berlin — Düsseldorf	651	183	2 —
Francfort — Paris (307 km. en Allemagne)	651	66	
Berlin — Mannheim	635	85	
Berlin — Cologne	633	262	3 lignes. 1 mixte.
Berlin — Hanovre — Cologne	633	198	
Berlin — Coblence	594	37	
Berlin — Dortmund	575	108	
Berlin — Francfort	574	561	5 lignes.
Berlin — Nordhausen — Cassel — Francfort	574	165	
Berlin — Hagen — Bochum	568	134	
Berlin — Essen-s.-l.-Ruhr	558	140	
Berlin — Elberfeld	554	93	
Berlin — Oppeln — Gleiwitz	553	143	
Leipzig — Stuttgart	519	45	
Cologne — Leipzig	518	109	
Francfort — Hambourg	513	236	2 lignes.

510 831 au lieu de 444 954. La longueur des lignes aériennes a augmenté de 9,56 %; celle des lignes souterraines de 29,79 %. Le nombre des communications a atteint un milliard : par jour il y a eu environ 3 millions de communications. Les communications locales ont augmenté de 10,9 %; les communications interurbaines ont augmenté de 22,5 %, et les communications éloignées de 13,1 %.

Les réseaux principaux étaient caractérisés au mois de décembre 1905 par les chiffres précédents (Voir tableau, p. 77).

Le nombre d'appareils employés sur les réseaux locaux était de 537 196, dont 504 654 bureaux, 27 468 armoires, 2 765 multiples, 2 032 meubles et 277 tables d'appareils.

Ce réseau de lignes de jonction comprend 5 234 lignes doubles avec 503 494 kilomètres de longueur de fil.

E. B.

ÉCLAIRAGE

***Sur le photomètre sphérique d'Ulbricht.* — M. Corsepius.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 17 mai 1906.

L'auteur donne la description d'un photomètre sphérique qu'il a employé et indique les résultats qu'il a obtenus avec cet appareil. Le diamètre intérieur est de 2 mètres ; la sphère est partagée en deux moitiés par un écran vertical. L'une des moitiés est fixée au sol ; l'autre moitié est mobile (fig. 1) et porte des roulettes qui roulent sur

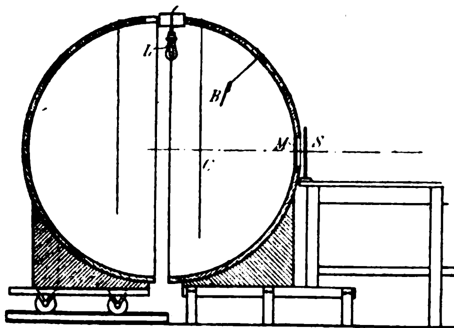


Fig. 1.

des rails en fer. Chaque demi-sphère consiste en une carcasse en fer recouverte d'un revêtement en plâtre présentant une surface mate. La fenêtre M a 20 centimètres de diamètre ; l'ouverture de l'écran S placé à l'origine du banc photométrique est de 16 centimètres et peut être diminuée à volonté. L'écran B est fixé à une tige scellée dans le plâtre.

Pour étalonner cet appareil, on a employé deux lampes à incandescence dont l'intensité sphérique avait été déterminée à la Reichanstalt. Un certain nombre d'essais furent faits pour déterminer l'influence de la répartition dissymétrique de la source lumineuse et les dimensions de l'ombre portée par l'écran B. Celui-ci était ovale. La lampe L était placée à $28^{cm},5$ de la paroi supérieure de la sphère ; sa distance à l'écran B était de 34 centimètres. Un autre essai fut fait sur l'éclairement de la surface intérieure de la sphère. Pour cela on plaça en différents points des feuilles de papier photographique protégées par des écrans de l'action directe de la lampe. Les résultats montrèrent qu'il n'y a pas de différence sensible aux différents points. Les lampes-étalons étaient l'une de 32 bougies sous 110 volts avec filament en boucle, l'autre de 16 bougies sous 50 volts avec filament en U. Le banc photométrique avait une longueur de 2 mètres.

Quand on veut photométrer des lampes Nernst ou des lampes à arc, la présence des supports plus ou moins volumineux, qui portent des ombres, fausse le résultat des mesures. D'après Ulbricht, le rapport de l'éclairement produit quand la source lumineuse ne présente pas de parties portant ombre, à l'éclairement produit quand la source lumineuse est munie d'accessoires, est donné par la formule

$$\frac{H_0}{H} = \left(1 + \frac{O \cdot a_1 (1 - a)}{4\pi r^2 a}\right) \Big/ 1,$$

O étant la surface des parties accessoires de la lampe. La constante du photomètre varie avec O ; par exemple Ulbricht a trouvé que, pour O = 1 265, elle variait de 54,8 %. Le photomètre de cet expérimentateur avait 50 centimètres de diamètre. Celui de l'auteur ayant 2 mètres de diamètre, et la surface d'une lampe Siemens étant de 670 centimètres carrés pour les tiges de réglage, les charbons, le cendrier et le réflecteur, la modification de la constante, si l'on suppose les mêmes conditions d'absorption, doit être de :

$$\frac{670}{1\,265} \cdot \frac{25^2}{100^2} \cdot 54,8 = 1,82\ \%.$$

Une autre cause entraînant une augmentation de la constante K du photomètre, c'est que l'ouverture d'introduction était fermée par une

feuille d'amiante portant un trou de 9 centimètres de diamètre quand on photométrait des lampes à incandescence et n'était pas fermée quand on photométrait des lampes à arc. Pour $a = 0,16$, la constante était augmentée dans le rapport de

$$1 \Big/ \left(1 + \frac{0.84}{0,16} \cdot \frac{314}{4 \cdot 100^2 \cdot \pi}\right) = 1/1,0131,$$

soit de 1,3 °/₀, pour les mesures de lampes à arc. Pour les mesures de lampes à incandescence, ou de lampes Nernst, elle était augmentée dans le rapport de

$$1 \Big/ \left(1 + \frac{0.84}{0,16} \cdot \frac{63.7}{4 \cdot 100^2 \cdot \pi}\right) = 1/1,00267,$$

soit de 0,27 °/₀. La différence entre les deux cas est donc seulement de 1 °/₀. Par conséquent, l'intensité lumineuse J, calculée avec la constante déterminée au moyen des lampes à incandescence doit être augmentée, au total, de $1,82 + 1 = 2,82$ °/₀ environ.

Une lampe de Körting et Matthiessen présentait une surface de 531 centimètres carrés. Si on la compare avec une lampe à arc photométrée par Ulbricht ayant 750 centimètres carrés de surface et 41,2 °/₀ d'augmentation, on trouve, comme précédemment, un accroissement de 2,8 °/₀. Si, pour les lampes Nernst, on pose $O = 331$ centimètres carrés, et $a_1 = 0,4$, on trouve que l'augmentation de la constante est de 1,1 °/₀.

L'auteur a fait des expériences pour déterminer l'exactitude des résultats ainsi obtenus par le calcul et a trouvé une bonne concordance. On voit donc que, dans le photomètre dont il s'agit, l'influence des parties obscures et de leurs différentes surfaces est très peu importante. On peut d'ailleurs rendre le résultat plus exact en faisant la correction indiquée ci-dessus.

NATURE DE LA LAMPE	INTENSITÉ DE COURANT	DIFFÉRENCE DE POTENTIEL aux bornes.	DIFFÉRENCE DE POTENTIEL à admettre dans le calcul.	J.	J. CORRIGÉ	CONSOMMATION EN WATTS	WATTS / J.	REMARQUES
Lampe à arc à courant continu S et H..	11,2	41	55	495	509	616	1,19	
— — K et M..	11,2	41	55	511	525	616	1,17	
— à courant alternatif S. H..	9,33	29,7	55	157	161	512	3,18	Normalement 10 ampères, 29 volts.
	10,9	31,9	55	233	246	599	2,44	
3 lampes à incandescence de 16 bougies.	ens. 1,328	110	110	25,41	25,41	146,1	5,75	Neuves.
1 — de 16 —	0,446	110	110	7,1	7,1	48,1	6,92	Après 100 heures.
3 — de 16 —	1,435	110	110	43,0	43,0	158	3,67	Autre lot : neuves.
1 — de 32 —	0,845	110	110	25,3	25,3	93,0	3,67	A peu près neuves.
3 — de 32 —	2,421	110	110	70,0	70,0	266,5	3,80	Id.
1 — de 32 —	0,916	110	110	26,2 26,3 26,4	26,3	100,7	3,83	Après 100 heures.
1 lampe Nernst	1,10	110	110	72,2	73,1			Neuves.
	1,08	110	110	71,8	72,6			Id.
	1,033	110	110	58,8	59,6			Id.
	1,023	110	110	52,7	53,3			A peu près neuves.
	0,945	110	110	39,7	40,2			Vieilles.
	0,941	110	110	35,6	36,0			Très vieilles.
	6,122				334,8	673	2,01	Somme ou moyenne.
3 lampes à osmium	2,931	110/3	110/3	52,5	52,5	104,2	1,99	A peu près neuves.
4 — au tantale	1,471	110	110	68,7	68,7	162	2,36	Neuves.
3 — —	1,134	110	110	65,3	65,3	124,8	1,91	Après 5 heures.
Lampes au tantale dépolies	0,321	110	110	14,7	14,7	35,3	2,40	A peu près neuves.

On peut employer ce photomètre pour déterminer la répartition de la lumière émise par une source. Pour cela, on place la source lumineuse au centre de la sphère et on rapproche les deux moitiés jusqu'à ce qu'un intervalle de quelques millimètres seulement les sépare. La lumière sortant par cette fente permet de déterminer facilement la répartition lumineuse de la source à photométrer. A l'extérieur de la sphère est placée une échelle en degrés, et une bande de caoutchouc recouvre la fente : sous cette bande, on place, tous les 10° environ, une bande de papier photographique. Pour éviter que ces feuilles ne soient impressionnées par la lumière diffuse, on place une tôle noircie formant écran A.

L'auteur donne, pour terminer, des résultats numériques d'expériences faites avec le photomètre sphérique, résultats qui montrent l'emploi de l'appareil les améliorations à apporter et la diversité des lampes : en même temps les chiffres indiqués peuvent donner une idée du rendement lumineux de quelques-unes des nouvelles lampes électriques. D'une façon générale, on peut tirer de ces résultats les conclusions suivantes : les lampes à arc à courant continu sont bien supérieures aux lampes à arc à courant alternatif. La lampe à arc à courant alternatif de 10 ampères présente, dès qu'on la surcharge, un rendement meilleur ; d'une façon générale cependant les nouvelles lampes à incandescence doivent lui être préférées. Les lampes ordinaires à incandescence se comportent de différentes façons et donnent, en général, de mauvais résultats aussitôt qu'elles ont fonctionné une centaine d'heures.

Les conclusions de cette étude sont les suivantes :

Un grand diamètre et une division verticale du photomètre sphérique sont avantageux.

Le photomètre peut être employé à la détermination de la répartition lumineuse.

Il est important de dimensionner convenablement l'écran formant ombre.

Avec de gaands diamètres on peut, pour toutes sortes de lampes, employer la même constante.

Les observations faites permettent de tirer certaines conclusions intéressantes sur les propriétés particulières des différentes lampes.

E. B.

ÉLECTROCHIMIE

***Procédé électrolytique pour récupérer l'étain.* — Pusch.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, avril 1906.

La majeure partie de l'étain employé dans le monde entier sert à la fabrication du fer-blanc (boîtes de conserves, etc.), comme étamage ou comme soudure. La récupération de l'étain des récipients en fer-blanc présente donc un grand intérêt et permettrait de retrouver des quantités très importantes de ce métal. L'auteur décrit une méthode due à Bergsoe. Des corbeilles remplies de déchets de boîtes non nettoyées sont placées dans des récipients qui communiquent entre eux et dans lesquels circule une solution de chlorure d'étain avec environ 2 % d'étain. Le passage de cette solution dans les déchets de fer blanc produit la réaction



$$SnCl^4 + Sn = 2SnCl^2.$$

Dans le dernier récipient, une pompe prend le liquide et l'envoie dans des cuves d'électrolyse où la réaction inverse a lieu et où de l'étain est déposé avec formation de $SnCl^4$. Cette solution est à nouveau reprise et envoyée dans la série des récipients contenant les déchets de fer-blanc. Le métal obtenu dans les cuves à électrolyse est très pur et peut être utilisé tel quel.

E. B.

CHARTRES. — IMPRIMERIE DURAND, RUE FULBERT.

Le Gérant : J.-B. NOUET.

Tome XLVIII. Samedi 21 Juillet 1906. 13e Année. — N° 29.

L'Éclairage Électrique

REVUE HEBDOMADAIRE DES TRANSFORMATIONS

Electriques — Mécaniques — Thermiques

DE

L'ÉNERGIE

SUR L'APPLICATION DE L'AIMANTATION DISSYMÉTRIQUE DU FER EN COURANT ALTERNATIF

TRANSFORMATEUR STATIQUE DOUBLEUR DE FRÉQUENCE

Considérons un flux magnétique dont la variation périodique peut être représentée par l'expression $k\Phi_{max} \sin^2 \omega t$ (fig. 1). La force électromotrice induite par ce flux dans un circuit fixe qu'il traverse est de la forme :

$$- k\Phi_{max}\omega \, 2 \sin \omega t \cos \omega t = - k\Phi_{max}\omega \sin 2\, \omega t.$$

Si, avec un courant $I_{max} \sin \omega t$, nous arrivons à produire un flux magnétique dont les variations sont représentées par la figure 1, nous pourrons alors obtenir dans un enroulement fixe une fréquence double de celle de la différence de potentiel d'alimentation.

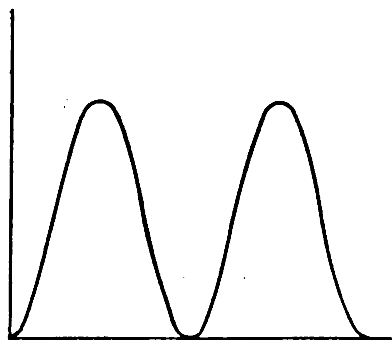


Fig. 1.

Principe de la disposition. — A et B (fig. 2) sont deux circuits magnétiques de transformateurs monophasés ordinaires ; D et D′ sont deux enroulements parcourus par du courant continu fourni par une source C ; dans leur circuit est insérée une bobine de self-induction E. F et G sont les bobinages primaires reliés en série et enroulés dans un sens tel que, lorsque la force magnétisante alternative produite par l'enroulement F s'ajoute à la force magnétisante constante produite par le circuit D, celle alternative de G se retranche de celle constante de D′.

H et H′ sont les enroulements secondaires de ces transformateurs partiels.

Chaque bobinage D et D′ seul produit dans le circuit magnétique correspondant un flux constant saturant le fer; les flèches indiquent la direction de ce flux. Pour fixer les idées, supposons que nous appliquions, par ces enroulements D et D′ dans chaque circuit magnétique, une force magnétisante constante de 8 ampère-tours centimètre, correspondant à une induction de 12 000 gauss environ.

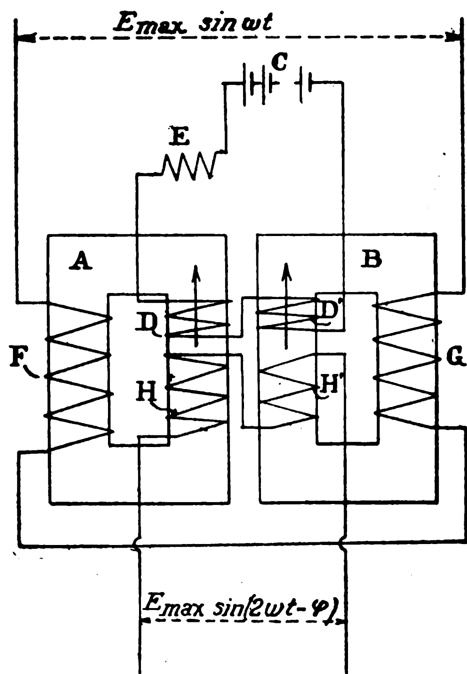


Fig. 2.

Alimentons ensuite les circuits F et G par un courant alternatif et déterminons quelle sera la courbe de variation du flux résultant dans les enroulements secondaires H et H′ à circuit ouvert, abstraction, faite de la période d'établissement du régime régulier.

Examinons la demi-période où la force magnétomotrice produite par le courant alternatif se retranche de celle continue dans la branche A et s'ajoute dans la branche B; dans l'autre demi-période, l'effet inverse se produira. Pour simplifier l'étude, nous allons négliger les fuites magnétiques et supposer constante la force magnétomotrice continue de D et D′ malgré les variations de flux qui se produisent dans ces enroulements; d'ailleurs la réactance E a pour objet d'atténuer les fluctuations qui tendraient à se produire.

Lorsque le courant alternatif est nul dans les enroulements primaires du transformateur, l'induction du fer correspond au point N (fig. 3) de la courbe d'aimantation du fer en fonction des forces magnétisantes : au fur et à mesure que l'intensité du courant croît, l'aimantation du fer décroît dans la branche A et passe par zéro pour une force magnétisante due au courant alternatif, légèrement supérieure, à cause de la force coercitive, à celle due au courant continu,

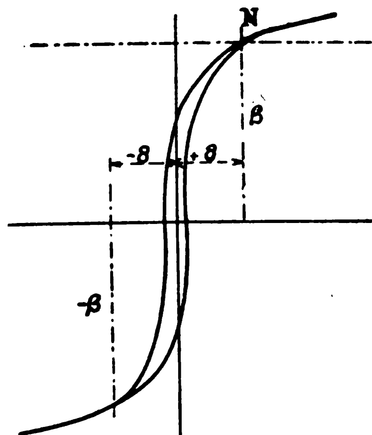


Fig. 3.

La valeur du courant alternatif continuant à augmenter, l'aimantation change de sens dans la branche A et décroît jusqu'au moment du maximum du courant alternatif. Si les enroulements ont été déterminés pour que la valeur maximum de la force magnétisante due au courant alternatif soit égale à deux fois celle continue, l'aimantation continuera à décroître jusqu'à $-\beta = \beta$.

Quand le courant alternatif repassera par zéro, l'induction redeviendra β en passant par toutes les valeurs intermédiaires.

Pendant cette demi-période, la force magnétomotrice du courant alternatif s'est ajoutée à celle continue dans la branche B; mais, par suite de la saturation du fer, l'induction n'y a varié que faiblement.

Les courbes de la figure 4 montrent les variations de l'induction dans les branches A et B du transformateur en prenant comme point de départ l'induction de 12 000 gauss.

Dans l'autre demi-période, l'effet inverse se produira; l'induction passera de $+\beta$ à $-\beta$ dans la branche B et ne variera que peu dans le noyau A.

La figure 5 montre les courbes résultantes des variations totales du flux dans les enroulements secondaires H et H′ connectés en série.

On voit aisément que le flux résultant dans les circuits secondaires ainsi que la force électromotrice induite sont d'une fréquence double de celle de la différence de potentiel d'alimentation.

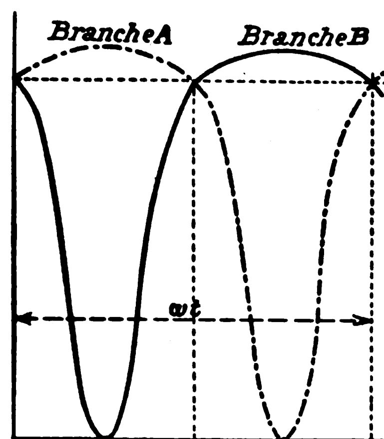


Fig. 4.

Les enroulements D-D′-H et H′ pourraient être placés sur une branche commune ; cette disposition serait semblable à celle d'un transformateur triphasé ou diphasé, ou bien, pour atténuer les fuites, les enroulements relatifs à chaque transformateur partiel pourraient être disposés concentriquement sur les branches extérieures, les deux noyaux intérieurs étant réunis en un seul.

Pour supprimer l'influence des courants induits dans les bobines D et D′ parcourues par le courant continu, il suffirait d'alimenter en série par la même source C un groupe de deux transformateurs semblables de fréquence, en ayant soin de disposer les enroulements parcourus par le courant continu de façon que les forces électromotrices induites s'opposent à chaque instant.

L'ensemble de la disposition décrite pourrait aussi s'appliquer aux circuits polyphasés. Dans ce cas, le courant continu de la source C ne subirait pas de fluctuations appréciables puisque la somme des forces magnétomotrices des différentes phases étant nulle, la variation résultante du flux dans les circuits parcourus par le courant continu serait aussi nulle.

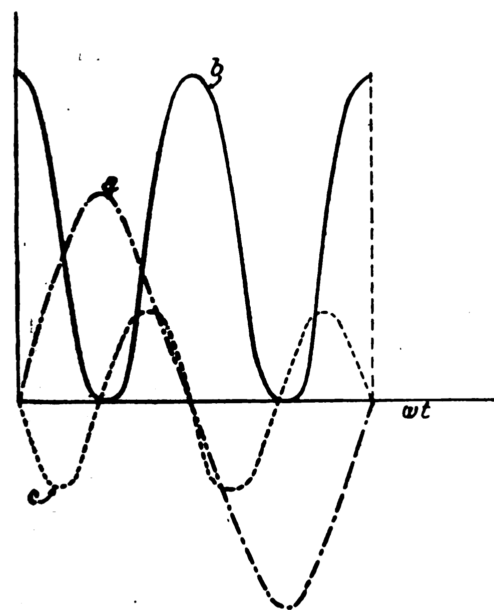


Fig. 5.
a, courant; *b*, flux dans les branches secondaires; *c*, f. é. m. induite secondaire.

Nous avons jusqu'à présent considéré le fonctionnement à vide d'un tel transformateur. En charge, le phénomène devient très complexe ; mais on peut cependant se rendre compte *a priori* que les courants induits dans les secondaires tendront à supprimer la dissymétrie provoquée dans le fer par le courant continu.

Autre application de la dissymétrie d'aimantation du fer. — On pourrait provoquer cette dissymétrie d'aimantation du fer dans une bobine de self-induction pour faire varier à volonté et d'une façon progressive son inductance, quand il n'est pas pratique de faire varier le nombre de spires, ou de déplacer son noyau de fer.

On n'aurait qu'à superposer, aux enroulements alimentés par le courant alternatif, des enroulements parcourus par du courant continu. Des dispositions spéciales pourraient être prises pour éviter les fluctuations de la force magnétisante produite par le courant continu, soit en plaçant en série dans le circuit de la source à force électromotrice constante une bobine de self-induction à grande inductance, soit en alimentant par la même source de courant continu deux bobines de self-induction principales en disposant convenablement les enroulements.

La solution serait plus simple dans le cas de bobines de self-induction pour circuits polyphasés, comme nous l'avons indiqué précédemment pour les transformateurs.

Par la variation du courant continu, on pourrait obtenir des valeurs très différentes de l'inductance de la bobine de self-induction. L'inconvénient de cette disposition serait de déformer la courbe du courant alternatif d'alimentation.

Quoique la dissymétrie d'aimantation provoquée dans le fer par une force magnétisante continue ne permette pas d'obtenir un transformateur statique de fréquence industriel, il nous a paru cependant intéressant de signaler quelques résultats qu'il était possible d'obtenir dès à présent de son application.

C. Léonard et L. Weber.

EXPRESSION DE LA PÉRIODE DE VIBRATION IONIQUE ET ÉLECTRONIQUE ET SES CONSÉQUENCES [1].

Étude du mouvement vibratoire des ions ou des électrons.

On a vu, dans une étude précédente [2], que l'analyse du phénomène de l'électrolyse conduisait à la formule $\rho = k^2 \times T$, comme expression de la résistivité électrolytique ou électrique, k^2 étant la constante d'attraction de la loi de Coulomb, T étant le temps nécessaire au passage de q coulombs, charge d'un ion ou d'un électron, c'est-à-dire par l'analyse même du phénomène, la *période de vibration* de la file d'ions ou d'électrons.

Il est donc nécessaire d'étudier le mouvement vibratoire des ions ou des électrons pour en déduire la période de vibration T, et pour l'introduire alors fructueusement dans l'expression de la résistivité électrolytique ou électrique.

Remarquons tout d'abord que le mouvement vibratoire ionique ou électronique n'est pas le même que celui du son ou de la lumière, ou des ondes électriques. On n'a jamais, en effet, constaté de phénomènes de réflexion, par exemple, et notamment de réflexion totale dans la transmission du courant électrique (non des ondes électriques). Quant au phénomène de pseudo-réfraction électrolytique de l'électricité, mis en évidence dans les expériences de Tribe [3], il s'explique tout simplement par ce fait que le courant électrique suit évidemment le chemin le moins résistant pour aller d'un point à un autre, puisque son passage même crée l'existence d'une tension (loi d'Ohm), — ou force contre-électromotrice, — proportionnelle justement à la résistance du chemin suivi. Cette même explication s'applique également au phénomène de pseudo-réfraction du courant électrique passant d'un métal dans un autre, étudié expérimentalement par Quincke [4].

En somme, le courant électrique suit le chemin qu'il peut parcourir avec le minimum de perte de charge, c'est-à-dire par conséquent le chemin le moins résistant.

(1) Voir dans l'*Éclairage Électrique*, tome XLII, 21 et 28 janvier, 4 février 1905, et tome XLVI, 24 mars 1906, les articles sur *Le phénomène de l'Électrolyse*.

(2) Voir *Éclairage Électrique*, 1905, tome XLII, n° 4.

(3) Voir *Lumière Électrique*, 1881, tome IV, page 318 et page 330 à page 333 et *Proceedings of the Royal Society of London*, 1881, vol. XXXII, p. 435 à 443.

(4) *Pogg. Ann.* Vol. XCVII (1856), page 382.

Cela posé, on sait que la loi de Coulomb relative aux attractions ou répulsions entre corps chargés d'électricité a pour expression :

$$f = \frac{k^2 q^2}{\varepsilon^2},$$

f = force d'attraction ou de répulsion entre deux corpuscules chargés d'une même quantité d'électricité q, et situés à une distance ε l'un de l'autre ; k^2 étant une constante pour un diélectrique donné, ayant comme dimensions L^2T^{-2} dans le système électromagnétique (¹), c'est-à-dire les dimensions du carré d'une vitesse. On sait, en effet, ainsi que l'a établi Maxwell et que l'a vérifié l'expérience, que la constante k^2 de la loi de Coulomb est inversement proportionnelle au carré de l'indice de réfraction pour la lumière du diélectrique considéré, et par suite directement proportionnelle au carré de la vitesse de la lumière dans le diélectrique en question.

Considérons un ion, tête de files d'ions (ou un électron), situé à une distance variable x de l'électrode, ou de l'amenée de courant. Il est soumis à une force :

$$f = \frac{k^2 q^2}{x^2},$$

force d'attraction avant d'avoir touché l'électrode, force de répulsion après l'avoir touchée et avoir ainsi acquis une charge q de même signe que celle de l'électrode. De telle sorte que l'on pourrait faire une convention de signe et écrire $f = -\frac{k^2 \times q \times q'}{\varepsilon^2}$.

Quand q et q' sont de signe contraire, f est *positif* et il y a *attraction*. Quand q et q' sont de même signe, f est *négatif* et il y a *répulsion*.

On voit par là le caractère de ce mouvement vibratoire ionique ou électronique et sa différence profonde avec celui des ondes lumineuses ou sonores, par exemple, pour lesquelles il y a un centre d'attraction fictif et une attraction directement proportionnelle à la distance.

Ici, au contraire, il y a changement brusque du signe de la force, inversement proportionnelle au carré de la distance, au moment où l'ion touche l'électrode et que sa charge électrique même change de signe. A l'attraction succède alors brusquement la répulsion, avec des valeurs absolues égales en fonction de la distance. L'ion ayant ainsi acquis une charge électrique contraire à sa charge habituelle serait alors repoussé en théorie jusqu'à l'infini, en pratique jusqu'à l'autre électrode, ou tout au moins s'intercalerait-il dans la file d'ions, s'il ne rencontrait immédiatement au voisinage de l'électrode par suite du renversement de l'orientation des ions, un ion de même nature chimique, normalement chargé d'une même quantité d'électricité, mais de signe contraire, et si ces deux ions ne s'unissaient alors, par la neutralisation de leur charge électrique contraire, en une molécule neutre, libérée ainsi exclusivement au voisinage immédiat de l'électrode, et non en un point quelconque de l'électrolyte. L'ion ayant touché l'électrode ne s'intercale pas dans la file d'ions, parce qu'il peut aussitôt entrer en réaction avec un ion de même nature chimique, mais différemment chargé au point de vue électrique, pour donner naissance à une molécule neutre par la saturation réciproque de leur charge électrique différente. On voit ici nettement apparaître la notion de *valence atomique*, et le mode de production des *liaisons* entre les atomes dans la molécule.

En réalité, l'ion ne vient pas *toucher* l'électrode : il s'en approche jusqu'au moment où la distance est suffisamment petite pour qu'il y ait décharge à travers l'épaisseur correspon-

(¹) Voir *Éclairage Électrique*, 1905, n° 4, page 135.

dante du diélectrique, sous forme d'une étincelle extrêmement petite, et l'ordre de grandeur de la tension des ions, quelques volts au maximum, donne une idée de l'ordre de grandeur des espaces interioniques, si l'on considère les valeurs du tableau suivant relatif aux distances explosives dans l'air.

DISTANCES EXPLOSIVES ET TENSIONS

Entre sphères égales de 22^mm de diamètre (Expériences de M. Mascart) Électricité statique.		Entre deux disques (Expériences de Warren de la Rue) Électricité des piles électriques.	
Distance explosive.	Tension.	Tension.	Distance explosive.
cm.	Volts.	Volts.	cm.
0,1	5 490	1 000	0,020
0,5	26 730	2 000	0,043
1	48 600	5 000	0,1176
3	76 800	10 000	0,2863
6	101 400	11 330	0,3378
9	115 800		
12	124 200		
15	127 800		
22	130 000		

En supposant une loi simple de proportionnalité pour la distance explosive en fonction de la tension, ce qui est très voisin de la réalité pour les faibles tensions, d'après les chiffres du tableau précédent, et en admettant approximativement une même valeur pour la distance explosive dans l'eau diélectrique et dans l'air, on voit que, pour une tension entre les ions de 1 volt, la distance qui les sépare serait de $\frac{0^{cm},020}{1\,000} = 0^{cm},00002$, c'est-à-dire de l'ordre du dix-millième de millimètre. Le nombre d'ions d'une seule espèce qu'il y a dans 1 centimètre cube est donc de l'ordre :

$$\left(\frac{m}{V}\right) = \frac{1}{\varepsilon^3} = \frac{1}{(0^{cm},00002)^3} = \frac{1}{0,000\,000\,000\,000\,008} = 125\,000\,000\,000\,000$$

soit 125 trillions d'ions d'une seule espèce dans 1 centimètre cube.

Or, dans ce même centimètre cube, il y a :

1° Un nombre d'ions d'une espèce de l'ordre de 125 trillions ;

2° Un nombre égal d'ions de l'autre espèce ;

3° Un nombre de molécules neutres du même ordre de grandeur, d'après les lois de l'ionisation qu'on verra plus loin ;

4° Entre tous ces ions et toutes ces molécules se trouvent encore les molécules du diélectrique ;

5° Les électrons du diélectrique, corps conducteur électrique, non électrolytique, ayant une existence distincte de celle des molécules, ainsi qu'on sera porté à l'admettre plus loin, d'après l'influence de la température sur la résistivité électrique ;

6° Les espaces intermoléculaires, analogues aux espaces interplanétaires.

En divisant cette force f par la masse M de l'ion (ou de l'électron), on a les dimensions d'une accélération, et en écrivant alors la proportionnalité des accélérations aux forces, on a, γ étant une constante absolue, sans dimensions :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\gamma \frac{k^2q^2}{M} \times \frac{1}{r^2}.$$

Multiplions les deux membres de cette égalité par $2\frac{dx}{dt}$, on obtient :

$$2\frac{d^2x}{dt^2}\times\frac{dx}{dt}=-2\gamma\frac{k^2q^2}{M}\times\frac{1}{x^2}\times\frac{dx}{dt},$$

et en intégrant une première fois :

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)^2=+2\gamma\frac{k^2q^2}{M}\times\frac{1}{x}+\text{constante}.$$

Si l'on remarque que pour $x\rightarrow\infty$, la force d'attraction ou de répulsion est nulle, la vitesse elle-même est nulle par conséquent $\left(\frac{dx}{dt}=0\right)$, on voit que la constante d'intégration est nulle. On a donc :

$$\frac{dx}{dt}=kq\frac{\sqrt{2\gamma}}{\sqrt{M}}\times\left(\frac{1}{x}\right)^{\frac{1}{2}},$$

et l'on remarque immédiatement que les vitesses de déplacement sont inversement proportionnelles à la racine carrée de la masse de l'ion (ou de l'électron). On retrouve ce fait dans les lois de la diffusion, par exemple, dont la vitesse est inversement proportionnelle à la racine carrée du poids moléculaire d'après les expériences de Bunsen.

Remarquons en passant que cette vitesse élémentaire de déplacement des ions, de vibration en un mot, contient en germe la *vitesse même de la réaction,* qui sera l'objet d'une étude et d'un développement ultérieurs.

En séparant les variables, on a :

$$\sqrt{x}\times dx=kq\times\sqrt{\frac{2\gamma}{M}}\times dt,$$

et en intégrant une seconde fois :

$$x^{\frac{3}{2}}=\frac{3}{2}k\times q\times\sqrt{\frac{2\gamma}{M}}\times t+\text{constante}.$$

Prenons l'origine du temps pour $x=0$. La constante d'intégration est alors nulle, et l'on a :

$$x^{\frac{3}{2}}=\frac{3}{2}k\times q\times\sqrt{\frac{2\gamma}{M}}\times t.$$

Montrons que cette équation est homogène par sa vérification par l'équation aux dimensions dans le système électromagnétique :

$$L^{\frac{3}{2}}=LT^{-1}\times L^{\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}\times M^{-\frac{1}{2}}\times T.$$

Période de vibration de la file d'ions ou d'électrons.

Cherchons le temps nécessaire à un ion pour parcourir ε ; faisons pour cela $x=\varepsilon$ dans l'expression précédente. On obtient :

$$t_\varepsilon=\frac{2}{3}\times\frac{\sqrt{M}}{k\times q\times\sqrt{2\gamma}}\times\varepsilon^{\frac{3}{2}}.$$

Or, l'analyse du phénomène de l'électrolyse nous a montré que la période de vibration T de la file d'ions (ou d'électrons) pouvait se décomposer en plusieurs temps :

Attraction puis répulsion des ions extrêmes, suivies d'un double renversement de l'orientation des ions, tous temps pendant lesquels interviennent les mêmes valeurs ε.

D'autre part, le double renversement périodique de l'orientation des ions nécessite,

avons-nous vu, un accord dans les vibrations des ions têtes de files, — accord qui se manifeste par le phénomène du déplacement des ions, têtes de files —, dont on verra aujourd'hui la relation avec la masse de l'ion.

Il suit de là que les divers temps élémentaires ont également comme valeur t_1, et la période de vibration T est un multiple simple de t_1. On peut donc écrire :

$$T = \alpha \times \frac{\sqrt{M}}{k \times q} \times \varepsilon^{\frac{3}{2}},$$

et la formule de la résistivité électrolytique ou électrique peut dès lors s'écrire :

$$\rho = k^2 \times T = \alpha \times \frac{k}{q} \times \sqrt{M} \times \varepsilon^{\frac{3}{2}} = \alpha \times \frac{k}{q} \times \sqrt{M'} \times \varepsilon'^{\frac{3}{2}},$$

l'accentuation se rapportant à l'autre électrode.

On a vu dans une étude précédente(¹) qu'il se produisait un déplacement relatif des ions têtes de file aux électrodes. La présente étude montre la relation de ce déplacement avec la masse de l'ion.

Il résulte, en effet, de cette dernière équation que l'on a :

$$\sqrt{M \times \varepsilon^3} = \sqrt{M' \times \varepsilon'^3},$$

c'est-à-dire que *le produit de la masse de l'ion par le volume de l'espace qui le contient est constant, pour toute file d'ions en état de vibration électrolytique*.

Si l'on remarque que l'on a :

$$\frac{1}{\varepsilon^3} = \frac{m}{V} \qquad \text{et} \qquad \frac{1}{\varepsilon'^3} = \left(\frac{m}{V}\right)'$$

c'est-à-dire que 1 ion dans un volume ε^3 correspond à m ions dans le volume V (même valeur de la concentration ionique, au voisinage de l'électrode et au moment où toutes les files d'ion sont en activité, par suite au moment de la polarisation), on peut remplacer ε de la formule par sa relation avec la concentration en ions, et l'on obtient ainsi :

$$\rho \times \left(\frac{m}{V}\right)^{\frac{1}{2}} \times \frac{1}{\sqrt{M}} = \alpha \times \frac{k}{q} = \rho \times \left(\frac{m}{V}\right)'^{\frac{1}{2}} \times \frac{1}{\sqrt{M'}},$$

l'accentuation étant relative à l'autre électrode.

Montrons par l'équation aux dimensions que cette relation est homogène, et que c'est bien $\left(\frac{m}{V}\right)^{\frac{1}{2}}$, et non $\left(\frac{m}{V}\right)$, qui doit en effet y figurer. Nous verrons plus tard l'importance de ce fait.

On a bien :

$$L^2T^{-1} \times L^{-\frac{3}{2}} \times M^{-\frac{1}{2}} = LT^{-1} \times L^{-\frac{1}{2}} M^{-\frac{1}{2}}.$$

Conséquences.

Concentrations limites aux électrodes au moment de la polarisation simultanée

La dernière relation ci-dessus donne :

$$\frac{\left(\frac{m}{V}\right)}{M} = \frac{\left(\frac{m}{V}\right)'}{M'},$$

(¹) Voir *Éclairage Électrique*, 1906, t. XLVI, n° 12, p. 446.

déduite d'ailleurs de la nécessité d'une même période de vibration pour les ions têtes de files, pour qu'il y ait accord pour le double renversement périodique de l'orientation des ions.

Ainsi, au moment de la polarisation simultanée aux deux électrodes, les concentrations ioniques au voisinage des électrodes sont proportionnelles aux masses des ions correspondants.

Écartement des ions têtes de files des électrodes.

Pour toute file d'ions orientés en état de vibration électrolytique, il faut qu'il y ait accord dans les vibrations des ions têtes de files pour le double renversement périodique de l'orientation des ions. Écrivons donc que la période de vibration est la même pour ses deux extrémités :

$$T = \frac{\alpha}{kq} \times \sqrt{M} \times \varepsilon^{\frac{3}{2}} = \frac{\alpha}{kq} \times \sqrt{M'} \times \varepsilon'^{\frac{3}{2}},$$

d'où l'on déduit :

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon'} = \sqrt[3]{\frac{M'}{M}},$$

ou :

$$\frac{C'_i}{C_i} = \frac{M'}{M},$$

C'_i et C_i étant les concentrations ioniques des extrémités de la file d'ions.

Pour un très petit nombre de files d'ions en état de vibration électrolytique, c'est-à-dire pour le passage d'une faible densité de courant, ces déplacements des ions têtes de files et les variations correspondantes de la concentration aux électrodes passeront inaperçues. C'est au contraire au moment de la polarisation de l'électrode, c'est-à-dire au moment où toutes les files d'ions seront en vibration, que les concentrations correspondant aux masses des ions s'établiront nettement aux électrodes.

Ce n'est donc que d'une manière approchée qu'on peut s'attendre à vérifier ces résultats au moyen des déterminations de Kohlrausch sur le *Transport des ions,* d'autant plus que la loi d'Ostwald sur la dilution qui permet de passer de la concentration en ions à celle de l'électrolyte non ionisé ne serait exacte, ainsi que nous le verrons plus loin, que si la tension de décomposition de l'électrolyte était constante et indépendante de la concentration des ions, ce qui n'est pas et ne peut pas être.

Quoi qu'il en soit, et avec ces restrictions, la loi d'Ostwald donne :

$$\frac{C_i^2}{C_s} = k \text{ (constante)},$$

(C_i = concentration des ions ; C_s = concentration de l'électrolyte non ionisé), et l'on aurait par suite :

$$\frac{C'_i}{C_i} = \sqrt{\frac{C'_s}{C_s}} = \frac{M'}{M},$$

ou :

$$\frac{C'_s}{C_s} = \left(\frac{M'}{M}\right)^2.$$

Certaines déterminations de Kohlrausch(1), résumées dans le tableau suivant, vérifient suffisamment bien cette relation.

(1) *Wied. Ann.*, tome L (1893), page 385.

ÉLECTROLYTE	$\frac{C'_s}{C_s}$	$\frac{M'}{M}$	$\left(\frac{M'}{M}\right)^2$
KCl.	$\frac{5}{5}=1$	$\frac{35,5}{39}=0,9$	0,8
NaCl..	$\frac{65}{35}=2$	$\frac{35,5}{23}=1,5$	2,2
SO^4Cu.	$\frac{70}{30}=2,3$	$\frac{96}{63}=1,5$	2,3
SO^4Zn.	$\frac{70}{30}=2,3$	$\frac{96}{65,5}=1,5$	2,2
CO^3K^2.	$\frac{35}{65}=0,6$	$\frac{60}{78}=0,8$	0,6

La conductibilité moléculaire. — Remarquant que le quotient de la conductibilité électrique d'un électrolyte par le nombre de molécules existant dans l'unité de volume tendait vers une valeur déterminée quand la dilution augmentait au delà de toutes limites, et supposant qu'à ce moment l'ionisation de l'électrolyte était totale, différents expérimentateurs admettaient que le rapport de la conductibilité électrique μ d'un électrolyte pour une concentration donnée à sa conductibilité μ_∞ pour une dilution infinie définissait la fraction ionisée de l'électrolyte pour la concentration en question (¹).

Or, on a, par définition même :

$$\mu\left(\frac{1}{\rho}\right)\Big/\left(\frac{N}{V}\right)=\frac{V}{\rho N},$$

ρ étant la résistivité de l'électrolyte pour une concentration de N molécules-grammes dissous dans V litres,

$$\mu_\infty=\frac{V'}{(\rho N)_\infty},$$

et par suite :

$$\frac{\mu}{\mu_\infty}=\frac{V}{\rho N}\times\frac{(\rho N)_\infty}{V'},$$

d'où l'on déduit :

$$\rho=\frac{V(\rho N)_\infty}{NV'\times\frac{\mu}{\mu_\infty}}.$$

Portons cette valeur de ρ dans l'expression trouvée plus haut et dont nous avons montré l'homogénéité :

$$\rho\times\left(\frac{m}{V}\right)^{\frac{1}{2}}=\text{constante}=k.$$

On en déduit :

$$\left(\frac{m}{V}\right)=k^2\times\left(\frac{N}{V}\right)^2\times\left(\frac{V'}{(\rho N)_\infty}\right)^2\times\left(\frac{\mu}{\mu_\infty}\right)^2.$$

Or, la fraction ionisée d'électrolyte est : $\left(\frac{m}{V}\right)\Big/\left(\frac{N}{V}\right)$, c'est-à-dire :

$$i=\left(\frac{m}{V}\right)\Big/\left(\frac{N}{V}\right)=k^2\times\left(\frac{V'}{(\rho N)_\infty}\right)^2\times\left(\frac{\mu}{\mu_\infty}\right)^2\times\frac{N}{V},\qquad\text{et non}\quad\frac{\mu}{\mu_\infty}.$$

La fraction ionisée ne serait proportionnelle à $\frac{\mu}{\mu_\infty}$ que si l'on avait : $\rho\times\frac{m}{V}=$ constante.

(¹) Voir *Éclairage Électrique*, 1905, tome XLII, n° 3, page 86.

Or, nous avons vu plus haut, par *homogénéité,* qu'il ne pouvait pas en être ainsi.

Le rapport $\frac{\mu}{\mu_\infty}$ ne définit donc pas la fraction ionisée de l'électrolyte.

Résistivité électrolytique et concentration. — Inexactitude de la loi d'Ostwald. — Vraie loi de la dilution : état de minimum d'énergie potentielle du système électrolytique.

L'étude précédente nous a conduits à la relation :

$$\rho \times \left(\frac{m}{V}\right)^{\frac{1}{2}} = \text{constante.}$$

Si donc on connaissait $\left(\frac{m}{V}\right)$ en fonction de la concentration apparente $\left(\frac{N}{V}\right)$ de l'électrolyte, on connaîtrait par là même la relation de ρ avec la concentration $\left(\frac{N}{V}\right)$.

Ostwald (1) avait donné une loi de la dilution, c'est-à-dire de l'ionisation, en traitant les ions comme des molécules et en écrivant par suite l'équilibre chimique entre les ions et l'électrolyte :

$$\frac{C_i^2}{C_s} = \text{constante, à température constante ;}$$

C_i = concentration des ions ;

C_s = concentration de l'électrolyte non ionisé.

Cette relation est inexacte, et il est facile de le démontrer : en effet, l'équilibre chimique se produit au moment où la force électromotrice de la réaction est nulle (2), et les ions, au contraire, possèdent toujours une tension; l'une des manifestations de l'ionisation de l'électrolyte, c'est justement l'existence d'une tension propre de décomposition.

Ecrivons que l'*ionisation spontanée* d'un électrolyte réalise un *état de minimum d'énergie potentielle,* comme tout état d'équilibre stable d'un système libre (3), et ce sera, en effet, écrire l'équilibre physico-chimique de l'électrolyte, mais en tenant compte de la tension variable avec la distance, c'est-à-dire avec la concentration, possédée par les ions et de leur charge électrique constante, loi électrochimique expérimentale de Faraday, dont nous verrons plus loin la raison.

En désignant par :

e, l'énergie interne en calories par molécules-kilogrammes d'une molécule de l'électrolyte considéré ;

e', l'énergie interne moyenne des ions de cet électrolyte ;

v, la tension commune des groupes d'ions, c'est-à-dire la différence de potentiel entre deux ions de charge électrique contraire ;

q, la valeur constante de leur charge électrique positive ou négative ;

α, un coefficient d'équivalence de l'énergie électrique à l'énergie calorifique ;

ν, le nombre d'ions provenant d'une molécule d'électrolyte ;

N, le nombre initial de molécules d'électrolyte ;

m, le nombre de molécules d'électrolyte disparues par ionisation ;

p, la pression osmotique des molécules d'électrolyte ;

(1) *Zeitschrift für physikalische Chemie,* II, 278.
(2) *Éclairage Électrique,* 1903 tome XXXIV, n° 5, page 156.
(3) Voir *Éclairage Électrique,* 1903, t. XXXIV, n° 5, p. 151.

p', la pression osmotique des groupes d'ions;
T, la température absolue,
et sachant que l'énergie moléculaire externe a pour expression $2T \times \text{Log}\, p$ (¹),
on a, Y désignant l'énergie potentielle actuelle du système :

$$Y = \underbrace{(N - m) \times [e + 2T \times \text{Log}\, p]}_{\text{Énergie potentielle de l'électrolyte non ionisé}} + \underbrace{m \times \nu \times \left[e' + 2T \times \text{Log}\, p' + \frac{\alpha}{\nu} \times q \times v\right]}_{\text{Énergie potentielle de l'électrolyte ionisé.}}.$$

En remarquant que la pression osmotique est proportionnelle au nombre de molécules-grammes par litre, c'est-à-dire que l'on a, V étant le volume total de l'électrolyte et k une constante :

$$p = k \times \frac{N - m}{V},$$

$$p' = k \times \frac{m \times \nu}{V},$$

l'expression précédente devient :

$$Y = (N - m) \times \left[e + 2T \times \text{Log}\, k \times \frac{N - m}{V}\right] + m \times \nu \times \left[e' + \frac{\alpha}{\nu} qv + 2T \times \text{Log}\, k \times \frac{m\nu}{V}\right].$$

La variation d'énergie potentielle la plus petite compatible avec les liaisons du système se produirait si *une* molécule nouvelle s'ionisait encore en ce moment, et sans qu'il soit nécessaire de différentier l'équation précédente, on voit que la variation correspondante d'énergie potentielle du système serait la suivante, les variations de la pression osmotique et de la tension électrique étant alors des infiniment petits du second ordre, mathématiquement négligeables :

$$\Delta Y = \underbrace{-\left(e + 2T \times \text{Log}\, k \times \frac{N - m}{V}\right)}_{\text{— Énergie mise en liberté par disparition actuelle d'une molécule d'électrolyte.}} + \underbrace{\nu \times \left[e + \frac{\alpha}{\nu} qv + 2T \times \text{Log}\, k \times \frac{m\nu}{V}\right]}_{\text{+ Énergie possédée actuellement par } \nu \text{ groupes d'ions provenant de la disparition d'une molécule d'électrolyte.}}.$$

Écrivons que l'énergie potentielle du système est minimum, c'est-à-dire posons : $\Delta Y = 0$.
On en déduit :

$$2T \times \text{Log} \frac{\left(\frac{km\nu}{V}\right)^{\nu}}{k \times \left(\frac{N - m}{V}\right)} = e - \nu e' - \alpha q v.$$

Or, v est fonction de la distance des ions, par suite, de la concentration, puisque la capacité est fonction de cette distance, et que la loi électrochimique de Faraday montre que c et v sont deux fonctions inverses, car l'on a :

$$c \times v = q = \text{constante (charge d'un ion)}.$$

On n'a donc pas, à température constante,

$$\frac{\left(\frac{km\nu}{V}\right)^{\nu}}{k\left(\frac{N - m}{V}\right)} = \text{constante},$$

c'est-à-dire la loi d'Ostwald.

(¹) Voir *Éclairage Électrique*, 1903, tome XXXIV, n° 5, page 153.

Vérification expérimentale. — Nous allons vérifier par l'expérience cette expression de la tension de décomposition de l'électrolyte, en en faisant l'application au cas de l'acide chlorhydrique dont la tension de décomposition v est très variable avec la concentration.

Comme $\left(\frac{m}{V}\right)$ intervenant dans cette expression sera déterminé par la relation précédemment trouvée :

$$\rho \times \left(\frac{m}{V}\right)^{\frac{1}{2}} = \text{constante},$$

cette seconde relation se trouvera elle-même vérifiée par l'expérience.

Cependant, comme la résistivité n'est pas exactement déterminée, pour les raisons que nous verrons plus loin, et qu'il serait d'autre part nécessaire d'extrapoler pour avoir les valeurs correspondant à celles de la tension déterminées par un autre expérimentateur, il est préférable de calculer $\left(\frac{m}{V}\right)$ d'après les déterminations de ρ et de tracer alors la courbe de $\left(\frac{m}{V}\right)$ en fonction de la concentration $\left(\frac{N}{V}\right)$.

Le tableau suivant est déduit des mesures de Kohlrausch sur la résistivité de l'acide chlorhydrique à différentes concentrations. On calcule le nombre de molécules-grammes par litre $\frac{N}{V}$ d'après le pourcentage x °/₀ et le poids spécifique π de la solution, par la relation :

$$\frac{N}{V} = \frac{10 \times x \times \pi}{M} = \frac{10 \times x \times \pi}{36{,}5}.$$

[1 000 grammes de dissolution contiennent en effet $10 \times x$ °/₀ grammes d'acide HCl, c'est-à-dire $\frac{10 \times x\,\%}{M = 36{,}5}$ molécules-grammes d'acide, et occupent un volume $V = \frac{1}{\pi}$.]

°/₀ DE HCl x	POIDS SPÉCIFIQUE de la solution à 15° C. π	RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE de la solution à 18° C. ρ	QUANTITÉ PROPORTIONNELLE à $\left(\frac{m}{V}\right)$ $\frac{1}{\rho^2}$	NOMBRE DE MOLÉCULES-GRAMMES de HCl par litre. $\frac{N}{V} = \frac{10 \times x \times \pi}{36{,}5}$	INDICE DE RÉFRACTION de la solution. $n = 1 + 0{,}33 \times \pi$	QUANTITÉ PROPORTIONNELLE à $\left(\frac{m}{V}\right)$ avec correction par l'indice de réfraction (1). $\frac{1}{\rho^2 \times n^2}$
°/₀		Ohms				
5	1,0242	2,554	0,1533	1,403	1,338	0,0856
10	1,0490	1,598	0,3916	2,874	1,346	0,2162
15	1,0744	1,352	0,5471	4,415	1,355	0,2978
20	1,1001	1,323	0,5713	6,028	1,363	0,3075
25	1,1262	1,394	0,5146	7,538	1,372	0,2734
30	1,1524	1,522	0,4317	9,472	1,380	0,2267
35	1,1775	1,704	0,3444	11,291	1,388	0,1788
40	1,2007	1,955	0,2616	13,159	1,396	0,1343

(1) C'est-à-dire en tenant compte de la variation de k^2 de la loi de Coulomb par la variation de l'indice de réfraction avec la concentration. On verra dans le prochain article l'introduction de cette correction : k^2 a les dimensions du carré d'une vitesse, et, ainsi que l'a établi Mawxell, cette constante est en effet proportionnelle au carré de la vitesse de la lumière dans le diélectrique considéré, et par suite inversement proportionnelle au carré de l'indice de réfraction de l'électrolyte.

La courbe de la figure 1 interprète ces résultats et montre que l'on a très sensiblement jusque vers 15 % :

$$\frac{m}{V} = \delta \times \frac{N}{V},$$

c'est-à-dire une loi de proportionnalité.

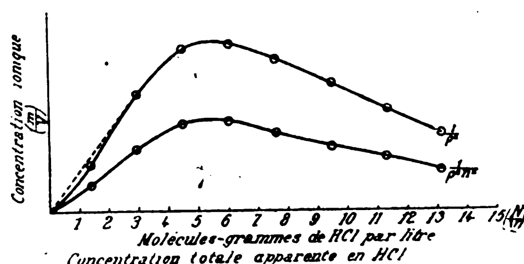


Fig. 1. — Concentration ionique en fonction de la concentration totale apparente des solutions aqueuses d'acide chlorhydrique, d'après la résistivité de ces solutions.

L'expression précédente pour le cas de l'acide chlorhydrique ($\nu = 2$; une molécule de HCl donne 2 ions), devient :

$$v = A - B \times \log \frac{\left(2k\frac{m}{V}\right)^2}{k\left(\frac{N-m}{V}\right)}.$$

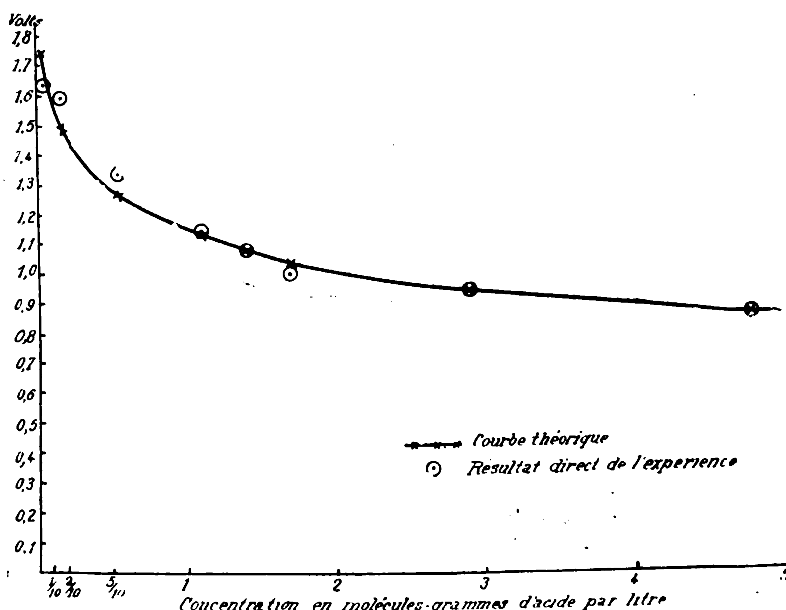


Fig. 2. — Tension de décomposition de l'acide chlorhydrique en fonction de la concentration.

Portons dans cette relation :

$$\left(\frac{m}{V}\right) = \delta \times \left(\frac{N}{V}\right).$$

On en déduit :

$$v = A - B \times \log \frac{4k \times \delta^2 \times \left(\frac{N}{V}\right)^2}{\frac{N}{V} \times (1 - \delta)} = A' - B' \times \log \frac{N}{V}.$$

Les déterminations expérimentales suivantes de M. Rothé [1], dont l'approximation serait de 0v,05 d'après l'auteur, vérifient cette relation, et la courbe qui interprète ces résultats montre la concordance de la théorie et de l'expérience.

TENSION DE DÉCOMPOSITION DES SOLUTIONS AQUEUSES D'ACIDE CHLORHYDRIQUE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION

$$v = 1 \text{ volt}, 14 - 0,48 \times \log\left(\frac{N}{V}\right).$$

POIDS SPÉCIFIQUE de la SOLUTION π	% DE HCl x	NOMBRE DE MOLÉCULES-GRAMMES de HCl par litre. $\frac{N}{V}$	$\log\left(\frac{N}{V}\right)$	TENSION DE DÉCOMPOSITION ÉLECTRIQUE Théorie.	Expérience.
	%			Volt.	Volt.
1,001	0,2	0,055	−1,261	1,74	1,63
1,003	0,67	0,18	−0,735	1,49	1,59
1,010	2	0,55	−0,257	1,26	1,34
1,0193	4	1,1	+0,04	1,13	1,145
1,0242	5	1,4	+0,146	1,07	1,07
1,0291	6	1,69	+0,228	1,03	0,99
1,0490	10	2,87	+0,458	0,92	0,92
1,0795	16	4,732	+0,675	0,82	0,82

Variations relatives de ρ et de $\left(\frac{m}{V}\right)$. — La relation trouvée précédemment :

$$\rho^2 \times \left(\frac{m}{V}\right) = \text{constante},$$

résout cette question.

On voit que la résistivité et la concentration ionique à une électrode varient suivant une cubique, genre d'hyperbole équilatère.

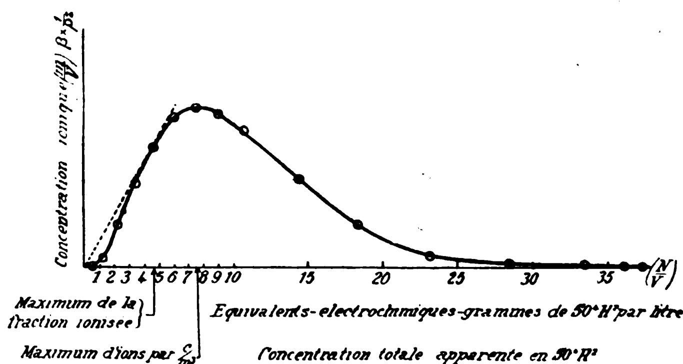


Fig. 3. — Concentration ionique en fonction de la concentration totale apparente des solutions aqueuses d'acide sulfurique, d'après la résistivité de ces solutions.

Le minimum de résistivité de l'électrolyte se produit au moment du maximum de la concentration ionique, ce qui ne veut pas dire que la fraction ionisée de l'électrolyte soit maxima à ce moment.

(1) *Bulletin de la Société française de Physique*, 1904, 2e fascicule, p. 117.

Un exemple éclairera nettement la question.

Le tableau suivant est déduit des mesures de Kohlrausch sur la résistivité de l'acide sulfurique à différentes concentrations.

°/° de SO^4H^2 x	POIDS SPÉCIFIQUE de la solution à 15° C. π	RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE de la solution à 18° C. ρ	QUANTITÉ proportionnelle à $\frac{m}{V}$ sans correction par l'indice de réfraction. $\frac{1}{\rho^2}$	NOMBRE D'ÉQUIVALENTS électrochimiques-grammes de SO^4H^2 par litre. $\frac{N}{V} = \frac{10 \times x \times \pi}{\frac{98}{2} = 49}$
°/°		Ohms		
1	1,0066	21,99	0,002068	0,20543
2,5	1,0161	9,249	0,01169	0,5184
5	1,0331	4,833	0,04281	1,054
10	1,0673	2,574	0,150935	2,178
15	1,1036	1,855	0,2906	3,378
20	1,1414	1,544	0,4195	4,6588
25	1,1807	1,406	0,5059	6,0241
30	1,2207	1,365	0,5367	7,4737
35	1,2625	1,392	0,5161	9,0179
40	1,3056	1,483	0,4547	10,658
50	1,3984	1,866	0,2872	14,27
60	1,5019	2,705	0,1367	18,39
70	1,6146	4,679	0,04568	23,07
80	1,7320	9,141	0,01197	28,278
90	1,8167	9,387	0,01135	33,368
97	1,8390	12,58	0,006319	36,447
99,4	1,8354	118	0,00007182	37,23

La courbe de la figure 3 interprète ces résultats et montre l'allure générale de l'ionisation en fonction de la concentration.

Le maximum d'ions par unité de volume correspond au minimum de résistivité de la solution, et la concentration apparente de l'électrolyte est par suite facilement déterminée.

En considérant un point quelconque de la courbe de $\left(\frac{m}{V}\right)$ en fonction de $\left(\frac{N}{V}\right)$, et en le reliant à l'origine par une droite faisant un angle α avec l'axe des $\left(\frac{N}{V}\right)$, on voit que l'on a :

$$\left(\frac{m}{V}\right) \Big/ \left(\frac{N}{V}\right) = \operatorname{tg} \alpha.$$

Or $\left(\frac{m}{V}\right) \Big/ \left(\frac{N}{V}\right)$ définit justement la fraction ionisée de l'électrolyte, et par suite la concentration qui correspond à la fraction ionisée maxima s'obtient en menant par l'origine une tangente à la courbe, et en prenant la concentration qui correspond au point de tangence.

L'ionisation ne serait donc pas totale pour la dilution infinie, mais passerait par un maximum pour une concentration bien déterminée, si l'on pouvait se reposer absolument sur ces mesures de résistivité. Nous verrons malheureusement qu'il n'en est rien, et il faudrait par suite avoir recours à la tonométrie pour trancher définitivement la question.

Si l'ionisation était totale pour la dilution infinie, la courbe de $\left(\frac{m}{V}\right)$ en fonction de $\left(\frac{N}{V}\right)$ partirait donc sous un angle initial de 45° $\left(\frac{m}{V} = \frac{N}{V}, \text{ ionisation totale}\right)$, et se confondrait pratiquement avec sa tangente sur un certain parcours : nous avons admis pour le cas de l'acide chlorhydrique soit ce fait, soit une inflexion légère.

(A suivre.) Georges Rosset.

CHEMIN DE FER ÉLECTRIQUE A CRÉMAILLÈRE DE BRUNNEN A MORSCHACH

Le chemin de fer à crémaillère établi entre Brunnen et Morschach relie le port de Brunnen, sur le lac des quatre cantons, avec la pittoresque bourgade de Morschach, située à 200 mètres d'altitude au-dessus du niveau du lac. La longeur totale de la ligne est de $2^{km},1$ et l'établissement de celle-ci a présenté d'assez sérieuses difficultés. Sur la longueur totale du tracé, 1 200 mètres environ se trouvent en ligne droite et 900 mètres en courbes. Le plus petit rayon de courbure est de 80 mètres : le rayon moyen adopté en général est de 100 à 120 mètres. La rampe moyenne est de 12,5 °/₀ : la rampe maxima atteint 17 °/₀.

L'infrastructure de la voie est presque entièrement en rochers ou en granit. La voie a 1 mètre de largeur : les rails, ainsi que la crémaillère, sont posés sur des traverses en fer : les portions de crémaillère ont $3^m,50$ et les rails $10^m,50$ de longueur. En certains points, on a placé des contre-rails à l'intérieur des rails.

Le matériel roulant est semblable à celui employé à la Jungfrau et comprend, pour chaque train, une locomotive et une ou deux voitures de remorque contenant chacune 40 voyageurs.

La locomotive est représentée par la figure 1 : la figure 2 donne une vue des châssis. Chaque machine pèse 10 500 kilogrammes complètement équipée et peut remorquer, sur la rampe maxima de 17 °/₀, une charge de 15 500 kilogrammes à la vitesse de 9 kilomètres à l'heure. La partie mécanique a été construite par la Schweizerische Locomotivfabrik de Winterthur. Le châssis repose sur deux essieux porteurs. La roue dentée servant au freinage tourne librement sur l'essieu inférieur. Entre les deux essieux porteurs est placée la roue dentée motrice sur l'arbre de laquelle sont clavetés deux pignons dentés attaqués chacun, au moyen d'un engrenage, par un moteur. Le rapport de démultiplication réalisé par la double réduction d'engrenages est de 1/10,85. Les roues dentées sont établies en acier dur présentant 80 kilogrammes de charge de rupture et 12 °/₀ d'allongement ; les essieux sont en acier Martin de 60 kilogrammes de charge de rupture et 20 °/₀ d'allongement : les engrenages sont en acier Martin et les dents sont taillées à la fraise.

Il y a deux freins séparés agissant chacun sur une roue dentée, l'un sur la roue motrice, et l'autre sur la roue de freinage : ces freins sont établis de façon à éviter toute tendance au soulèvement de la roue dentée : un seul frein suffit au freinage du train en 5 secondes. Ces freins agissent d'une façon automatique sous l'action d'un solénoïde au cas où le courant vient à manquer. Les disques des freins sont refroidis par une circulation d'eau.

Avec une voiture poussée ou freinée par la locomotive, les charges sur les essieux de la locomotive sont de 6 700 kilogrammes en avant et 6 100 kilogrammes en arrière.

***

La locomotive porte deux moteurs triphasés établis par la Société Jacob Rieter. Les moteurs sont établis pour 750 volts et 50 périodes. L'effort maximum nécessaire sur la roue dentée motrice (avec deux voitures de remorque) est de 4 800 kilogrammes, ce qui correspond, pour une vitesse de 9 kilomètres à l'heure, à une puissance de 160 chevaux sur l'arbre de la roue dentée. Chaque moteur a donc été établi pour 85 chevaux en service normal et 100 chevaux en surcharge. Le démarrage de ces moteurs est effectué par introduction de résistances décroissantes dans le circuit des rotors. Ces rotors portent, outre l'enroulement triphasé, un enroulement à courant continu aboutissant à un petit collecteur. Cet

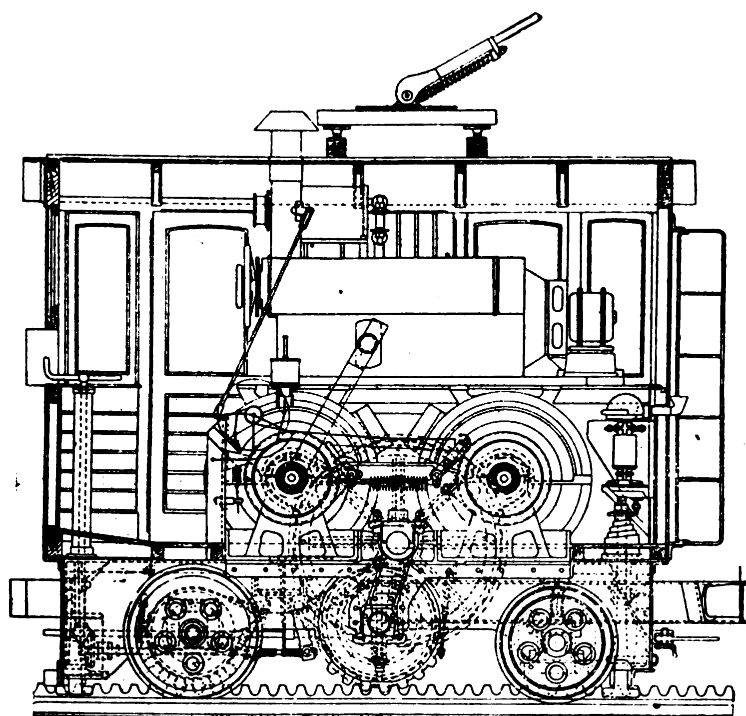


Fig. 1. — Vue d'une locomotive.

enroulement est relié à deux phases de l'enroulement triphasé du stator et forme ainsi une machine série fermée elle-même avec un champ magnétique intense. L'enroulement triphasé du rotor, qui tourne aussi dans ce champ, est fermé sur des résistances de freinage. Un mécanisme solidaire de l'interrupteur principal produit le relèvement des balais sur les deux collecteurs avant l'envoi du courant au stator des deux moteurs, et l'application de ces balais sur des collecteurs au moment de la rupture du courant.

Le schéma des connexions de la locomotive est représenté par la figure 3. Les courants triphasés, amenés par deux lignes de contact aériennes, passent par un interrupteur bipolaire fonctionnant comme disjoncteur automatique. L'une des trois bornes de chaque moteur est reliée au châssis et, par suite, aux rails de roulement qui servent de troisième conducteur triphasé. L'interrupteur comprend deux positions de marche, dont l'une correspond à la marche avant et l'autre à la marche arrière. Cet interrupteur est commandé par un volant placé sous la main du mécanicien. A côté de ce volant est disposé un second volant commandant le controller de marche qui règle la mise en circuit et hors circuit des résistances de démarrage et de freinage. Celles-ci sont placées dans un coffre muni d'une cheminée et

un ventilateur, entraîné par un petit moteur, envoie dans ce coffre un courant d'air froid qui, après avoir traversé les résistances, s'échappe par la cheminée. Un enclanchement entre les deux appareils de commande empêche de manœuvrer le controller avant que l'interrupteur soit fermé et inversement. Le frein automatique fonctionne dès que la vitesse de la locomotive dépasse une valeur déterminée ou dès que le disjoncteur a rompu le circuit primaire des moteurs. Ce frein est actionné par un solénoïde.

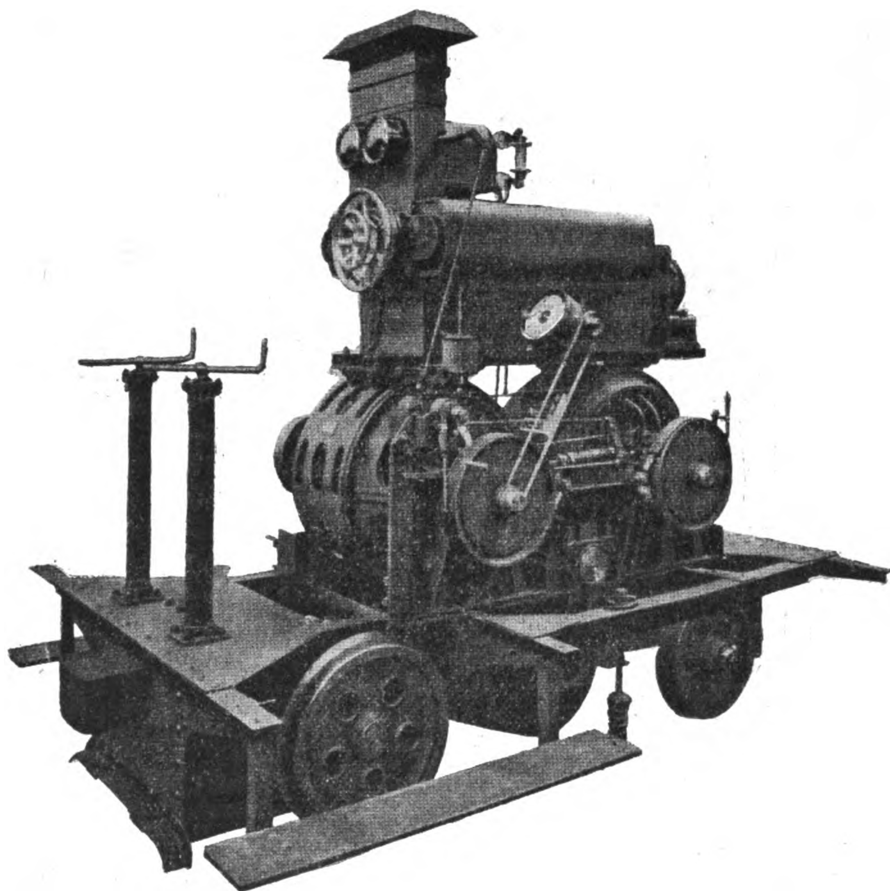


Fig. 2. — Vue du châssis d'une locomotive.

L'équipement est complété par un moteur-ventilateur, qu'alimente un petit transformateur abaissant la tension de 750 à 120 volts et fournissant le courant nécessaire à l'éclairage, par des fusibles, des parafoudres et des appareils de mesure et de contrôle.

L'énergie électrique servant à l'alimentation de la voie ferrée est fournie sous forme de courants triphasés à 8 000 volts et 50 périodes par l'usine génératrice de Altdorf. Un poste de transformateurs placé à Morschach abaisse la tension des courants triphasés de 8 000 à 750 volts au moyen de trois transformateurs monophasés de 75 kilovoltampères. Les enroulements à haute tension de ces transformateurs sont connectés en triangle, et les enroulements à basse tension en étoile : ce dispositif a été adopté en prévision d'une élévation de la tension primaire à 14 000 volts : à ce moment on connectera les primaires aussi en étoile.

Le poste de transformateurs contient simplement un interrupteur à huile, un tableau secondaire et les appareils nécessaires pour le raccordement avec la ligne à haute tension. Un appareil automatique, relié à la porte, met à la terre toutes les parties métalliques dès que celle-ci est ouverte. Le tableau secondaire porte deux interrupteurs à main fonctionnant également comme disjoncteurs à maxima.

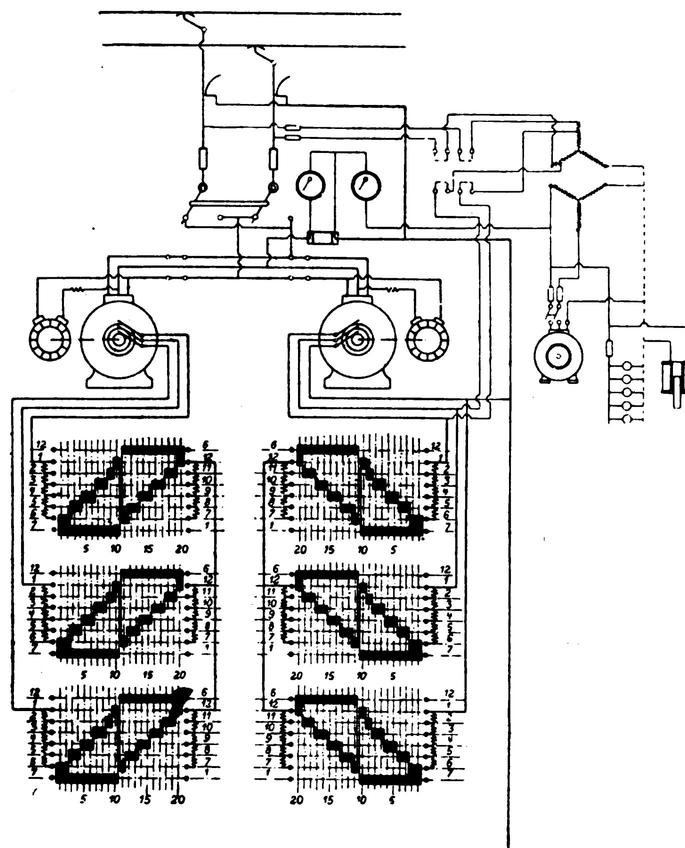


Fig. 3. — Schéma des connexions d'une locomotive.

La ligne de contact aérienne double comprend deux fils placés à 50 centimètres l'un de l'autre à une hauteur de 6 mètres au-dessus du niveau supérieur des rails et supportés par des fils transversaux soutenus par des poteaux en bois ou par des pylônes. Ces fils ronds en cuivre dur sont prévus pour une chute de tension de 6 %. Les aiguillages de la ligne de contact aérienne sont intéressants et comprennent chacun une pièce de croisement isolante et une tige mobile qui assure la continuité de la ligne. Cette tige mobile est reliée par des tiges de bois et des fils transversaux au poteau situé au droit de l'aiguille du rail, et elle est placée à la position convenable en même temps que cette dernière.

L'organe de prise de courant porté par la locomotive comprend deux perches munies d'un contact glissant en cuiller. Ces perches sont munies de ressorts établis en vue de l'abaissement à 4m,50 de la hauteur de la ligne aérienne dans les tunnels.

L'instillation totale a été ouverte au mois d'août dernier et fonctionne d'une façon tout à ait satisfaisante.

A. Solier.

REVUE INDUSTRIELLE ET SCIENTIFIQUE

THÉORIES ET GÉNÉRALITÉS

***Observations faites sur les rayons-canal.* — A. Rau.** — *Physikalische Zeitschrift*, 15 juin 1906.

Quand les rayons-canal tombent sur du verre ordinaire, il se produit une double luminescence : une fluorescence verte du verre lui-même et une couche lumineuse rouge-jaune apparaissant sur la surface atteinte et présentant les raies D. Les expériences décrites par l'auteur ont eu pour but de déterminer les conditions de production de ce phénomène.

Wien avait trouvé que, dans l'hydrogène, après une décharge de longue durée avec renouvellement continuel du gaz, on n'aperçoit que la fluorescence verte, tandis que dans l'oxygène, particulièrement après un bon séchage, il ne se produit plus que la luminescence du sodium. Le premier fait est en contradiction avec l'hypothèse suivante que la luminescence du sodium résulte de la température locale élevée produite par le choc des rayons-canal : au contraire les deux observations permettent de croire qu'il s'agit d'un phénomène accessoire, d'un phénomène d'oxydation, c'est-à-dire d'une luminescence chimique.

Pour vérifier cette hypothèse, l'auteur a pris d'abord de l'azote aussi pur que possible : les raies D existaient encore avec la même intensité, même lorsque, pour supprimer toute trace d'oxygène, on introduisait un fragment de sodium. Ce n'est donc pas un phénomène d'oxydation qui produit la luminescence. Comme, d'après Zelinder, il se produit à la cathode, c'est-à-dire au point atteint par les rayons-canal, une réaction chimique avec le sodium existant, l'auteur a répété l'expérience. Il a d'abord semblé nécessaire d'étudier dans d'autres gaz la production de la fluorescence verte qui apparaît à peine dans l'azote. Des expériences faites avec de l'hélium pur ont montré que la luminescence du sodium se produit, ainsi qu'une luminescence verte du verre assez intense.

A ces observations s'en joint une autre, faite également dans l'azote, c'est que la paroi de verre, lorsqu'elle a été précédemment soumise à des rayons cathodiques, ne présente pas d'abord la luminescence du sodium sous l'effet des rayons-canal : seules les portions qui avaient été protégées par un écran contre l'action des rayons cathodiques présentaient la luminescence rouge-jaune. Ce phénomène doit être dû à une modification chimique de la surface du verre. Dans l'hydrogène, les rayons-canal produisent une fluorescence tout à fait analogue à celle que produisent les rayons-canal : cette observation semble donner une explication plausible de l'absence ou de la faiblesse des raies D dans l'hydrogène et dans l'hélium, et de la contradiction entre l'hypothèse d'une luminescence du verre par suite de la température locale élevée et le phénomène observé dans ces gaz.

L'auteur a entrepris de déterminer la déviation électrostatique et électromagnétique, et le rapport e/m pour un gaz monoatomique. Il a répété deux fois l'expérience sur l'hélium en employant le dispositif de Wien, mais n'a obtenu aucun résultat final. Dans la première expérience, la présence d'hydrogène et la forte pulvérisation de la cathode en fer nickelé ayant produit des effets perturbateurs, l'auteur a employé ensuite une cathode recouverte d'aluminium et a cherché à faire diffuser l'hydrogène au moyen de platine incandescent. L'hélium était comprimé dans un petit tube de platine porté électriquement à l'incandescence et entouré d'un espace vide d'air. Les résultats obtenus comparativement pour l'hélium et pour l'hydrogène sont résumés dans le tableau suivant :

HÉLIUM		HYDROGÈNE	
e/m	DIFFÉRENCE de potentiel aux électrodes.	e/m	DIFFÉRENCE de potentiel aux électrodes.
27 300	6 500 volts	14 300	17 700 volts
27 500	9 600 —	15 400	24 900 —
27 300	9 700 —	17 200	24 900 —
28 200	20 400 —	15 000	29 100 —
49 000	33 000 —		

La différence entre les valeurs trouvées pour l'hydrogène et le chiffre 10 000 montrent qu'il existe une source d'erreurs constante. Ces observations indiquent que la majeure partie des rayons-canal de l'hélium a une vitesse beau-

coup plus faible que celle qui correspond à la différence de potentiel entre les électrodes. La courbure de la trajectoire dans le champ magnétique dépend du rapport de la différence de potentiel agissante à la charge spécifique. Si l'on pose pour l'hydrogène $e/m = 10000$ et si l'on mesure l'intensité du champ magnétique dans les expériences de l'auteur en se rapportant à cette valeur, on trouve, en admettant que d'autres causes n'entrent pas en jeu, que la vitesse des rayons-canal de l'hélium est environ 8 fois plus faible que celle qui devrait résulter de la différence de potentiel. B. L.

Sur quelques propriétés du radiothorium. — **O. Hahn.** — *Physikalische Zeitschrift.* 15 juin 1906.

L'auteur a déjà décrit le mode de préparation et les propriétés radio-actives d'une substance nommée radiothorium, qui représente vraisemblablement un produit de décomposition lente du thorium et est intermédiaire entre le thorium et le thorium X. Le radiothorium possède d'une façon très marquée toutes les propriétés radio-actives du thorium ; par suite de sa grande activité, il se prête bien à l'étude des radiations. L'auteur s'est proposé d'élucider les points suivants :

1° Pouvoir de pénétration des rayons α du corps actif dans l'air, mesuré par la méthode de scintillation et par la méthode électrique indiquée par Bragg et Kleeman ;

2° Nature complexe du produit désigné jusqu'à présent sous le nom de thorium B : ce produit se compose de deux produits différents de rayons α avec différents pouvoirs de pénétration pour l'air et d'autres corps.

3° Déviation magnétique et électrostatique des particules α du corps actif.

Pour mesurer le pouvoir de pénétration maximum des particules α du thorium B pour l'air, on a employé comme première méthode l'observation de la scintillation. Un petit écran à sulfure de zinc en verre fut placé verticalement sous le fil activé supporté par une petite table. Tant que l'écran est placé dans la zone d'action des rayons α, on observe sans difficulté la scintillation à l'aide d'une loupe. Au delà de la région d'ionisation, la scintillation disparaît, et la limite est nettement marquée. L'expérience montre que les rayons α de la partie active du thorium sont encore plus pénétrants que les rayons α les plus pénétrants du radium.

Les mesures d'ionisation dans la chambre de mesure furent faites pour des distances très variables de la source de radiation à la chambre. La vitesse de déviation de l'aiguille de l'électromètre servait de mesure pour l'intensité de l'ionisation.

Si l'on trace la courbe des résultats obtenus en portant en abscisses les valeurs de l'ionisation et en ordonnées les valeurs de la distance, on obtient une courbe complexe formée de deux parties bien distinctes. Cette courbe montre que le dépôt actif sur le fil émet deux différentes sortes de particules α avec différents pouvoirs de pénétration pour l'air. Il est nécessaire, pour des mesures exactes, de faire une correction pour la diminution d'activité pendant la durée de l'expérience. Le dépôt actif du thorium tombant à la moitié de sa valeur en 10 h. 6, on a, au bout d'une heure, une diminution d'environ 6,5 %. Cette correction pour la variation d'intensité pendant l'expérience est, en général, faible et facile à faire. La courbe montre que l'ionisation des rayons α commence pour une distance de $8^{cm},6$ de la source de radiation. Au delà de cette distance, la courbe est à peu près une droite verticale, et l'ionisation pour cette portion dépend des rayons β et γ et de l'activité du coffret et de l'air. En deçà de $8^{cm},6$, le courant dans la chambre d'ionisation croît très rapidement, atteint un maximum pour $6^{cm},8$ et diminue ensuite jusqu'à 5 centimètres, distance pour laquelle les particules α du second produit ajoutent leur action à celle du premier.

Le pouvoir d'ionisation des particules α peut être diminué par l'interposition d'écrans minces. La diminution du pouvoir de pénétration dépend de l'épaisseur et de la densité de l'écran employé. L'auteur a tracé une seconde courbe d'ionisation en recouvrant le fil d'une feuille mince de mica d'environ $0^{mm},018$ d'épaisseur. L'absorption des particules α dans cet écran correspondait à deux centimètres d'air. Les ordonnées de la nouvelle courbe étaient toutes diminuées d'une quantité constante, égale à deux centimètres : à part cela, la figure obtenue était la même que précédemment. Un effet analogue a été observé par Bragg et Kleeman pour les rayons du radium.

En collaboration avec le Pr Rutherford, l'auteur a fait quelques expériences sur la déviation électrique et magnétique des rayons α du dépôt

du thorium. Ils ont trouvé que la déviation est à peu près la même que pour les particules α du radium C. Pour l'étude de la déviation magnétique, le dispositif était le même que celui employé par Rutherford pour le radium C. Un fil fin activé servait de source de radiations. Une moitié du fil actif fut recouverte d'une feuille mince de mica, l'autre moitié n'étant pas recouverte. Au moyen de feuilles de mica, on faisait en sorte que la moitié d'une plaque photographique fût soumise aux rayons de la partie non recouverte et l'autre moitié aux rayons de la partie recouverte. Tout l'appareil était vidé et exposé pendant dix heures à un champ magnétique. Le sens de ce champ était inversé à intervalles réguliers. La déviation du faisceau de rayons était directement comparée avec la déviation obtenue, dans des conditions identiques, avec les rayons α du radium C. Les rayons α ayant un pouvoir de pénétration de 5 centimètres dans l'air sont plus déviés dans le champ magnétique et exercent une action photographique plus faible que les rayons possédant un pouvoir de pénétration de $8^{cm},6$.

La valeur de la déviation des rayons du thorium C, après passage à travers un écran mince en mica, fut de 20 °/₀ plus faible que pour les rayons du radium C ayant traversé le même écran. Si la valeur du rapport e/m est la même pour les particules α du thorium et celles du radium, on peut supposer que les particules α de $8^{cm},6$ de pouvoir de pénétration ont une plus grande vitesse que celles du radium C. Ce résultat concorde avec le plus grand pouvoir de pénétration des particules α du produit du thorium, car les rayons du radium C ont seulement un pouvoir de pénétration de $7^{cm},06$ pour l'air.

Le tableau suivant indique les produits du thorium actuellement connus :

PRODUIT	NATURE DES RAYONS ÉMIS	DURÉE DE DEMI-DÉCOMPOSITION
Thorium. . . .	vraisemblablement pas de rayons	environ 109 années
Radiothorium. .	α	?
Thorium X. . .	α	4 jours environ
Émanation. . .	α	54 secondes
Thorium A. . .	pas de rayons	10,6 heures
Thorium B. . .	α	55 minutes
Thorium C. . .	α, β, γ	vraisemblablement peu de secondes

B. L.

***Nouveau tube pour la production de rayons Röntgen.* — J. Rosenthal.** — *Physikalische Zeitschrift*, 15 juin 1906.

De l'anticathode des tubes ordinairement employés partent, à côté des rayons Röntgen, d'autres rayons qui ne peuvent pas traverser la paroi de verre et sont absorbés par elle : en outre, il y a aussi des rayons cathodiques réfléchis. Tous ces rayons sont absorbés par la paroi de verre et produisent soit de la fluorescence, de l'échauffement, et des modifications chimiques du verre, soit de nouveaux rayons. L'échauffement de la paroi de verre et sa modification chimique sont les causes principales de la variation du degré de dureté du tube. Les rayons cathodiques, ainsi que les rayons Röntgen très mous qui, les uns et les autres, ne peuvent pas traverser la paroi de verre, sont presque complètement absorbés par des couches métalliques minces qui sont presque entièrement transparentes pour les rayons Rœntgen employés pratiquement. L'auteur a été amené à construire un tube de Rœntgen « à filtre intérieur » dans lequel tous les rayons provenant de l'anticathode traversent, avant d'atteindre la paroi de verre, un filtre formé par une feuille métallique mince. La présence du filtre intérieur n'affaiblit pas, en pratique, les rayons Rœntgen produits.

B. L.

GÉNÉRATION ET TRANSFORMATION

Sur le calcul de moteurs à quatre temps. — *American Machinist.*

Le calcul des moteurs à quatre temps alimentés au moyen de combustibles liquides ou gazeux peut être effectué au moyen de formules empiriques générales qui conduisent à des valeurs approximatives. Ce calcul peut être conduit de la façon suivante :

La *vitesse de rotation* doit être choisie aussi grande que possible, tout en restant dans les limites assignées par la sécurité. Il faut tenir compte des surfaces portantes, des trépidations et des chocs : une grandeur particulièrement intéressante à envisager est la pression dont la valeur est la moyenne entre les deux pressions finales aux extrémités de la course. Si l'on désigne par J cette pression, on a la formule

$$J = k\omega l N^2,$$

ω étant le poids des masses en mouvement alternatif, l la longueur de course, N la vitesse de rotation par minute et k un coefficient (¹). De cette formule, on tire l'expression

$$N = \frac{k'}{\sqrt{l}}\sqrt{\frac{J}{\omega}}.$$

La vitesse est souvent déterminée par la vitesse du piston calculée empiriquement. Celle-ci varie suivant la puissance du moteur et est comprise entre 10 et 25 mètres : la valeur de 15 mètres est une bonne moyenne.

Le rapport de la course au diamètre du cylindre doit être d'environ 1,5/1 dans les cas ordinaires : les valeurs limites sont 1/1 et 2/1 et ne doivent être atteintes que dans des cas exceptionnels.

La *pression efficace moyenne* MEP est déterminée par la hauteur moyenne du diagramme de l'indicateur. Elle dépend principalement de la valeur de la compression et de la nature du combustible et augmente avec la compression.

La *pression de compression* doit être aussi élevée que possible, mais sans pouvoir occasionner d'inflammations prématurées. La plus basse température d'inflammation est présentée par la gazoline : ensuite viennent la kérosène, l'huile brute, le gaz d'éclairage et le gaz de hauts fourneaux. Suivant le combustible employé, on peut porter la valeur de la compression à quatre ou six atmosphères.

La puissance en chevaux effectifs est celle que l'on recueille sur l'arbre du moteur. *La puissance en chevaux indiqués* est donnée par la surface du diagramme d'indicateur. On dimensionne généralement la machine pour permettre des surcharges de 12,5 %. Le rapport de la puissance effective maxima à la puissance indiquée donne le rendement mécanique dont la valeur est en général de 80 % environ. En appelant IHP la puissance indiquée et EHP la puissance effective, on a IHP = (1,125/0,8)EHP = 1,4EHP. On peut dimensionner le cylindre de la façon suivante :

$$IHP = \frac{(MEP)\, l \times a \times x}{K}$$

en appelant l la course, a la surface du cylindre, x le nombre d'explosions par minute et K un coefficient, ou

$$IHP = \frac{(MEP)\, l \times d^2 \times N}{K'},$$

en appelant d le diamètre du cylindre, N le nombre de tours par minute et K′ un nouveau coefficient. Si l'on adopte une vitesse déterminée pour la vitesse du piston, on peut en déduire le diamètre du cylindre d'après la formule

$$d = K'' \sqrt{\frac{IHP}{MEP \times \text{vitesse du piston}}}$$

ou $$d = K''' \sqrt{\frac{IHP}{MEP\sqrt{l}}} \text{ (¹)}.$$

Pour employer cette formule, on détermine d'abord la valeur de IHP d'après la puissance donnée EHP, puis la valeur de MEP au moyen d'un tableau dans lequel on porte les valeurs de la compression et de EHP, puis on choisit l et on calcule d. Si le rapport l/d diffère beaucoup de 1,5, on choisit une nouvelle valeur pour l, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on atteigne à peu près ce rapport.

R. R.

Sur la réfrigération des moteurs à gaz de forte puissance. — *Power*, mars 1906.

Dans les machines de grande puissance, la circulation d'eau doit être prévue pour refroidir toutes les pièces exposées à la chaleur des gaz de la combustion, telles que les cylindres, les pistons, les tiges de piston, les soupapes d'admission et d'échappement, etc. L'eau de réfrigération emporte environ 33 % de la chaleur totale. Pour de l'eau entrant à 15° et sortant à 50°, il faut environ 24 litres d'eau par cheval-heure. Dans ce chiffre, 70 % environ sont employés à refroidir les parois du cylindre et 30 % à refroidir le piston et les soupapes.

La réfrigération de chacune des différentes parties doit être distincte des autres, de façon que l'on puisse modifier le refroidissement des différentes pièces. Les chambres de combustion doivent être maintenues aussi chaudes que possible, les parois des cylindres doivent être moyennement chaudes, le piston doit être le plus froid possible. Pour le refroidissement de

(¹) Ce coefficient est égal à 0,00001421 quand les longueurs sont exprimées en pouces et les poids en livres anglaises : la pression est alors exprimée en livres par pouce carré.

(¹) Dans le système d'unités anglaises, le coefficient K‴ a pour valeur 35,5.

ce dernier, il faut une canalisation particulière, car l'eau doit être introduite sous une pression de 4 à 5 atmosphères par une pompe spéciale.

Dans les moteurs de la Société de Nuremberg, il faut 30 litres d'eau par cheval-heure pour de l'eau entrant à 15° et sortant à 40° : cette consommation tombe à 2 ou même à 0,5 litre si l'on emploie un système de réfrigération pour l'eau qui circule. Si l'on admet que l'eau quitte à 35° les parois du cylindre, à 40° le piston, à 45° les soupapes, il faut 18 litres pour le cylindre, 8 litres pour le piston et sa tige, et 4 litres pour les soupapes. Le refroidissement de l'eau dans des tours de réfrigération offre, outre l'avantage de l'économie d'eau, l'avantage d'éviter les dépôts sur les surfaces métalliques. L'eau de réfrigération du piston doit toujours entrer par la partie inférieure et sortir par la partie supérieure, pour éviter les bulles d'air.

La méthode de réfrigération par injection, que l'on a pu employer avec succès sur des machines de faible puissance, n'est pas applicable aux gros moteurs, car il se produirait dans ceux-ci, sans réfrigération extérieure, des températures auxquelles aucun métal ne pourrait résister longtemps.

Pour amener l'eau de réfrigération au piston et à sa tige, le meilleur moyen est d'employer un tube souple et des jonctions coudées. Les tubes télescopiques sont peu recommandables.

B. L.

Moteur série monophasé Siemens-Schuckert *(suite)* (1). — **R. Richter.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 7 et 14 juin 1906.

II. Marche sans étincelles.

Quand le flux propre de l'induit est complètement annulé dans la zone neutre par un enroulement de compensation, deux forces électromotrices sont produites dans les tours de l'induit court-circuités par les balais, la tension de commutation et la f. é. m. induite statiquement. Ces deux forces électromotrices produisent les crachements aux balais, dont l'intensité dépend, comme pour les interrupteurs, de la somme géométrique des deux forces électromotrices et du courant produit par cette somme dans le circuit en court-circuit : plus est faible la tension résultante et le courant de court-circuit, et moins il y a d'étincelles aux balais. Le courant de court-circuit peut être réduit par l'emploi de jonctions résistantes entre le collecteur et l'enroulement induit, mais la f. é. m. n'est pas modifiée, en pratique : les étincelles sont donc réduites mais ne sont pas complètement supprimées.

Si la f. é. m. induite statiquement existait seule, c'est-à-dire si la bobine court-circuitée était entièrement dépourvue d'inductance, la résistance du circuit court-circuité pour laquelle, d'après l'étude précédente de l'auteur, les pertes au démarrage sont minima, donnerait aussi, en fonctionnement, le meilleur rendement. Mais en service, par suite de la fréquence élevée de la commutation, la résistance inductive de la bobine induite court-circuitée ne peut pas être négligée. La résistance ohmique du circuit en court-circuit, pour laquelle les pertes de démarrage sont minima, est par suite plus grande que celle pour laquelle les pertes totales en fonctionnement sont minima. C'est, en particulier, le cas quand la f. é. m. statique est très petite, c'est-à-dire quand le courant alternatif possède une faible fréquence. Les résistances calculées pour l'obtention du minimum des pertes de démarrage ne correspondent donc pas, en général, au meilleur rendement en service normal. La différence est peu importante, et il suffit de prendre pour la résistance ohmique du circuit court-circuité une valeur un peu plus faible que la valeur correspondant au minimum des pertes au démarrage.

L'enroulement supplémentaire décrit devrait, pour une même production d'étincelles aux balais, conduire à un meilleur rendement que l'emploi de jonctions résistantes ordinaires, particulièrement quand on construit le moteur avec des pôles auxiliaires de commutation en excitant ceux-ci par le courant principal. On pourrait construire ainsi un moteur à bon rendement sans étincelles en établissant le projet de telle façon que la f. é. m. induite statiquement soit faible, mais, ainsi que l'a déjà indiqué l'auteur, le collecteur doit avoir des dimensions d'autant plus réduites que la f. é. m. induite statiquement est plus grande. En effet, cette f. é. m. est donnée par la formule

$$e = \pi \frac{\tau_k}{\nu_k} \frac{P}{J} L, \qquad (9)$$

(1) Voir *Éclairage Électrique*, tome XLVIII, 14 juillet 1906, p. 69.

où τ_k indique le pas du collecteur, v_k la vitesse de celui-ci, P la fréquence du courant alternatif, L la puissance du moteur et J le courant dans l'induit. La valeur de ce courant, pour une puissance et une fréquence données, et pour un pas et une vitesse donnés, est donc d'une part inversement proportionnelle à la f. é. m. induite statiquement, et d'autre part à peu près proportionnelle à la longueur du collecteur. Si l'on pouvait annuler, par une tension opposée, la f. é. m. induite statiquement, non seulement on obtiendrait des conditions plus favorables pour une marche sans étincelles, mais encore on pourrait établir l'induit pour une plus faible intensité de courant et réduire les dimensions du collecteur. On a trouvé qu'il n'est pas possible de compenser, par une f. é. m. statique antagoniste, la f. é. m. induite statiquement. Toutes les expériences tentées dans ce but ont été infructueuses parce que le couple du moteur s'annulle en même temps que la f. é. m. résultante. On ne peut donc la compenser que par une f. é. m. engendrée par la rotation de l'induit. Cette f. é. m. de rotation doit être produite par un flux transversal décalé de un quart de période sur celle du flux principal, comme cela existe dans le moteur à répulsion et dans le moteur à répulsion compensé. L'idée de produire un tel flux transversal dans un moteur série ordinaire est venue à peu près simultanément aux ateliers d'Oerliken et aux ateliers Siemens-Schuckert : ces deux maisons emploient d'ailleurs, pour cela, des moyens différents. L'auteur décrit le moyen employé dans les moteurs Siemens-Schuckert.

Dans un moteur série ordinaire, l'enroulement induit, l'enroulement de compensation et l'enroulement excitateur sont parcourus par le même courant J. La force magnétomotrice de l'enroulement induit et celle de l'enroulement compensateur agissent à l'opposé l'une de l'autre, de sorte que la force magnétomotrice résultante est décalée de 180° sur le courant J. Pour compenser la f. é. m. induite statiquement par une f. é. m. due à la rotation, il faut un flux décalé de 90° en avance dans le temps sur le courant de l'enroulement excitateur. A l'intérieur de la zone neutre, c'est-à-dire dans la région où se trouvent les tours court-circuités de l'induit, la force magnétomotrice résultante doit être décalée en avance sur le courant excitateur d'un angle compris entre 90° et 180° (plus près de 90° ou de 180° suivant que la f. é. m. induite statiquement est supérieure à la tension de commutation ou inversement) afin de produire un flux qui annule ces deux forces électromotrices. On peut obtenir une telle force magnétomotrice ou bien en décalant le courant J_K de l'enroulement compensateur en arrière du courant moteur, ou bien en décalant le courant de l'induit J_a en avant du courant moteur.

Le premier cas est réalisé quand on place en parallèle avec l'enroulement compensateur une résistance ohmique. Le courant dans l'enroulement compensateur J_K est décalé d'environ 90° en arrière du courant dans la résistance J_W et la somme de ces deux courants passe ensuite dans l'enroulement induit et dans l'enroulement excitateur $J_a = J_e$. La force magnétomotrice résultante M_r (fig. 3) peut alors, par un choix convenable de la résistance reliée en parallèle et du nombre de tours de l'enroulement compensateur, avoir une grandeur et une phase telles que la f. é. m. résultante dans les tours de l'induit court-circuités soit nulle.

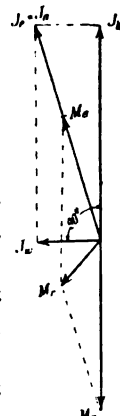


Fig. 3.

Le second cas est réalisé quand on connecte en parallèle avec l'induit une bobine de self-induction. Le courant de l'induit J_a en marche est en phase avec la tension, si l'on fait abstraction de la dispersion ; le courant dans la bobine de self-induction est décalé de 90° en arrière de celle-ci : le courant total qui représente leur somme passe à travers l'enroulement compensateur et à travers l'enroulement excitateur, de sorte que l'on peut encore, pour un choix judicieux du nombre de tours de l'enroulement compensateur et une valeur appropriée de la bobine de self-induction, obtenir la phase et la grandeur voulues pour la force magnétomotrice résultante. Le diagramme polaire est donné par la figure 4.

Quand on ne veut pas régler la valeur de la résistance et celle de la bobine de self-induction, le premier dispositif est plus avantageux que le second, car la force magnétomotrice est proportionnelle au courant de l'induit, tandis que, dans le second cas, pour une différence de potentiel invariable aux bornes du moteur, le courant varie peu dans la bobine de self-induction. Par

contre, le premier dispositif présente l'inconvénient de diminuer un peu le rendement du moteur, tandis que, avec le second montage, le rendement est peu modifié, mais le facteur de puissance abaissé. On pourrait remplacer par un condensateur la résistance employée avec le premier dispositif, la résistance de l'enroulement compensateur n'étant pas purement ohmique, comme on l'a admis pour plus de simplicité dans le diagramme de la figure 3. Quoique cette solution puisse être employée en pratique, puisque la puissance du condensateur doit être très faible vis-à-vis de celle du moteur, l'auteur ne s'y arrête pas, car seuls les deux dispositifs décrits ont été expérimentés et employés dans les moteurs Siemens-Schuckert.

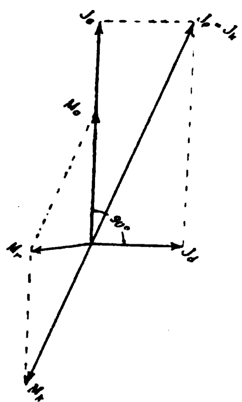


Fig. 4.

Dans les dispositifs décrits, le flux transversal nécessaire est produit, comme dans le moteur à répulsion et dans le moteur compensé, par l'enroulement induit et un enroulement statorique. On peut aussi le produire par un enroulement statorique particulier, en connectant cet enroulement auxiliaire soit en parallèle avec tout le moteur, soit en parallèle avec l'induit seul. Ces dispositifs ont été mentionnés pour la première fois dans le brevet allemand 162781 des ateliers d'Oerlikon, et ont été expérimentés avant la publication de ce brevet et indépendamment de ces inventeurs par les ateliers Siemens-Schuckert. La différence de potentiel aux bornes de l'enroulement auxiliaire détermine la phase du flux transversal qui est toujours décalé de 90° en arrière de celle-ci, quelle que soit la valeur de la force magnétomotrice de l'enroulement compensateur. Pour régler à volonté la direction du flux transversal, on peut employer le montage de la figure 5 avec un transformateur.

Dans le moteur Siemens-Schuckert, le flux transversal est produit par l'excitation mixte (excitation série et excitation shunt) d'un pôle auxiliaire dans la zone neutre, avec la précaution que les deux enroulements ne s'influencent que peu ou point. La figure 6 représente schématiquement un dispositif de ce genre. Le flux de l'induit est complètement neutralisé par l'enroulement compensateur. L'enroulement série H placé sur les pôles auxiliaires est parcouru

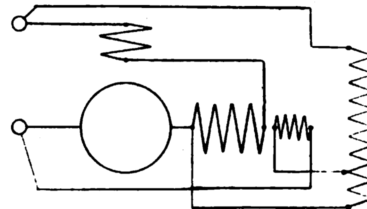


Fig. 5.

par le courant du moteur et est dimensionné de façon à produire un flux qui induise dans les tours de l'induit court-circuités une f. é. m. neutralisant la tension de commutation. L'enroulement shunt N, qui doit produire un flux neutralisant la f. é. m. induite statiquement et une

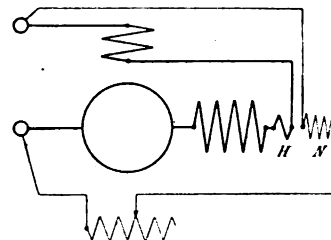


Fig. 6.

faible portion de la tension de commutation est placé aussi sur les pôles auxiliaires et est en série avec une bobine de self-induction dont le but est d'amortir le plus possible le courant induit par l'enroulement H dans l'enroulement-shunt : le flux de l'enroulement H peut se manifester avec d'autant plus d'intensité que la résistance de la bobine de self-induction est plus considérable. Le circuit shunt peut aussi être relié en dérivation sur les bornes de l'induit.

Le dispositif de la figure 7 est plus efficace et

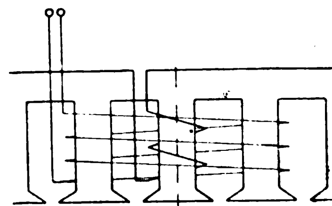


Fig. 7.

plus simple. Il repose sur l'emploi d'un stator uniformément denté comme celui d'un moteur triphasé. Pour simplifier la figure, on n'a pas représenté l'enroulement compensateur et l'en-

roulement excitateur. L'excitation série du pôle auxiliaire embrasse une dent du stator dans la zone neutre, tandis que l'enroulement shunt embrasse plusieurs dents. Le point important de cette disposition est que l'excitation série est placée à l'intérieur de l'excitation shunt, de sorte que le flux de l'enroulement série peut se refermer à l'intérieur de l'enroulement shunt et qu'il ne se produit que peu ou pas d'action d'induction sur ce dernier. Le dispositif le plus complet est celui de la figure 8. L'examen de

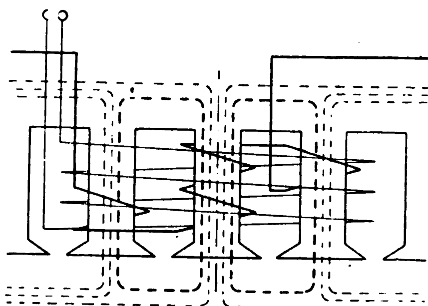


Fig. 8.

cette figure permet de voir que le flux de l'enroulement série est obligé de suivre un chemin déterminé compris à l'intérieur de l'enroulement shunt. Les lignes figurées en traits interrompus épais ou minces représentent les trajets du flux de l'enroulement série et du flux de l'enroulement shunt. Avec ce dispositif, les flux des deux enroulements peuvent se former indépendamment l'un de l'autre dans la zone neutre, de sorte que la tension de commutation et la f. é. m. induites statiquement peuvent être neutralisées séparément, ce qui, avec les dispositifs précédents, n'était réalisé qu'imparfaitement.

L'enroulement de la figure 8 peut être simplifié, comme on le voit d'après les figures 9 et 10. Dans la figure 9, les grands cercles repré-

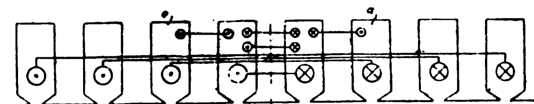


Fig. 9.

sentent les conducteurs de l'enroulement compensateur et les petits cercles les conducteurs de l'enroulement série du pôle auxiliaire. Dans les encoches *a*, on voit que le sens du courant dans l'enroulement-série est opposé à celui-ci dans l'enroulement compensateur. On peut donc supprimer dans les encoches *a* les conducteurs de l'enroulement série et adopter un nombre plus faible de conducteurs de l'enroulement compensateur : on obtient ainsi l'enroulement simplifié de la figure 10. L'espace économisé dans

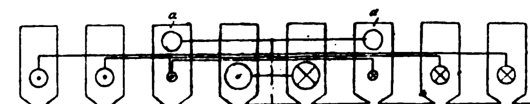


Fig. 10.

les encoches est utilisé pour loger l'enroulement-shunt, que représentent, sur la figure 10, un trait et deux cercles minces.

Pour inverser le sens de rotation d'un moteur à excitation transversale mixte, on ne modifie que l'enroulement excitateur des pôles principaux, sans changer le sens du courant dans l'induit, dans l'enroulement compensateur et dans l'enroulement shunt produisant le flux transversal.

Outre l'excitation mixte, les ateliers Siemens-Schuckert emploient, pour la neutralisation de la tension de commutation, un autre moyen indiqué par Schenkel et consistant à introduire au moyen du transformateur T (fig. 11) dans le

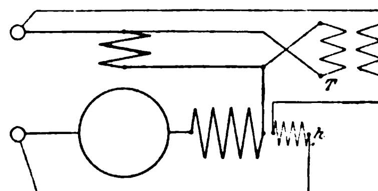


Fig. 11.

circuit shunt de l'excitation transversale, une autre f. é. m. qui, si elle existait seule, produirait dans l'enroulement auxiliaire *h* un flux capable de neutraliser la tension de commutation. La différence de potentiel E_h à l'enroulement auxiliaire est la somme de la différence de potentiel aux bornes K et de la tension E_T au transformateur T. Le courant dans l'enroulement auxiliaire i_h (perpendiculaire à E_h) peut être décomposé en deux composantes i_k perpendiculaire à K et i_T perpendiculaire à E_T. La composante i_T est à peu près proportionnelle au courant de l'induit et neutralise la tension de commutation à peu près pour toutes les charges ; la composante i_k neutralise une portion de la tension de

commutation et la f. é. m. induite statiquement.

La production du flux transversal avec la méthode indiquée par la figure 11 est aussi efficace qu'avec la méthode de l'excitation mixte sans influence mutuelle des deux enroulements, et la construction du moteur est au moins aussi simple. Mais l'excitation mixte est, en général, plus avantageuse parce que le transformateur T, qui d'ailleurs ne doit avoir qu'une faible puissance, est supprimé.

L'excitation mixte sans influence mutuelle entre l'enroulement série et l'enroulement shunt du pôle auxiliaire donne donc deux moyens pour neutraliser la tension de commutation à toutes les charges, comme dans le moteur à courant continu. La f. é. m. induite statiquement peut être neutralisée pour toutes les valeurs de la charge si l'on emploie un enroulement shunt réglable ; si, au contraire, on veut éviter le réglage de l'enroulement shunt, on ne peut neutraliser complètement la f. é. m. induite statiquement que pour une charge déterminée ; pour toutes les autres charges, la neutralisation est moins complète, mais toujours assez satisfaisante, de sorte qu'au point de vue des étincelles aux balais, un moteur série monophasé bien établi est tout à fait comparable à un moteur à courant continu.

Le flux shunt devant être décalé de 90° par rapport au flux excitateur, on n'obtiendrait le décalage convenable en connectant l'enroulement shunt en parallèle avec le moteur total, que quand le facteur de puissance du moteur serait à peu près égal à l'unité. Le montage en parallèle avec l'induit est donc le plus avantageux, car la différence de potentiel de l'induit et le flux excitateur sont pratiquement en phase. Si cela n'était pas suffisamment le cas, on devrait établir le dispositif de façon qu'une faible partie de la tension de commutation soit encore neutralisée par le flux de l'enroulement shunt. Le courant dans cet enroulement n'est que quelques centièmes du courant total du moteur (1 à 5 °/₀ normalement) et ne modifie que peu le facteur de puissance. Comme on le verra plus loin, il est possible d'atteindre l'unité comme valeur du facteur de puissance du moteur série.

La forme dans le temps du flux transversal doit être la même que celle de la f. é. m. induite statiquement, si l'on veut que celle-ci soit entièrement neutralisée. Cette condition n'est remplie que quand la différence de potentiel aux bornes du moteur est une fonction sinusoïdale simple du temps. Pour une marche sans étincelles, la forme sinusoïdale de la tension est donc la plus avantageuse, qu'il s'agisse du moteur série ou du moteur à répulsion compensé.

Si l'on veut comparer les résultats obtenus, au point de vue de la formation d'étincelles, avec le moteur Siemens-Schuckert et avec le moteur à répulsion compensé considéré jusqu'ici comme le moteur monophasé le plus parfait avec caractéristique série, on peut indiquer les points suivants :

1° Dans le moteur série des figures 3 et 11 ou avec excitation mixte (fig. 7 à 10) on peut neutraliser pour chaque charge la tension de commutation, ce qui n'est pas possible dans le moteur à répulsion compensé ;

2° Dans le moteur série à excitation mixte, la f. é. m. induite statiquement peut être neutralisée presque pour toutes les charges quand l'excitation de l'enroulement shunt du pôle auxiliaire, qui n'est parcourue que par un très faible courant, est réglée d'une façon convenable. Dans le moteur à répulsion compensé, la f. é. m. induite statiquement n'est neutralisée complètement qu'à la vitesse du synchronisme, même quand on règle simultanément la différence de potentiel aux bornes et l'intensité du courant d'excitation ;

3° Dans le moteur série de la figure 3, le flux transversal est toujours proportionnel au courant du moteur, et croît, comme cela est nécessaire, avec la charge sans réglage particulier, ce qui n'est pas le cas dans le moteur à répulsion compensé. Dans le moteur série à excitation mixte des pôles auxilaires, mais sans réglage de l'enroulement shunt, et dans le moteur de la figure 11, le flux transversal reste à peu près invariable pour neutraliser le f. é. m. induite statiquement comme dans le moteur à répulsion compensé. Pour neutraliser complètement la f. é. m. induite statiquement, il faut que le flux transversal croisse avec le couple pour une différence de potentiel invariable aux bornes, d'autant plus vite que le moteur est moins saturé. On devra donc dans les deux moteurs (si l'on ne veut pas régler la différence de potentiel de l'enroulement-shunt du moteur série) saturer aussi fortement que possible le fer afin de neutraliser aussi complètement que possible pour différentes charges la f. é. m. induite statiquement.

D'après ce qui précède, on peut considérer que le moteur série Siemens-Schuckert décrit précédemment est supérieur, à tous points de vue, au moteur à répulsion compensé en ce qui concerne la suppression des étincelles.

(A suivre.) R. V.

***Moteur monophasé à pôles saillants.* — Waters.** — *Elektrotechnik und Maschinenbau*, 17 juin 1906.

L'auteur indique que l'on peut obtenir, avec des moteurs à pôles saillants, une commutation presque aussi bonne qu'avec des moteurs à enroulements répartis, à condition de réunir des pôles entre eux par des pièces en métal magnétique. Dans ce but, on place de chaque côté de l'induit une bague en fer fixée aux côtés les pièces polaires par des rivets ou des vis. Des expériences ont montré qu'après l'adjonction de ces anneaux en fer, la commutation avait lieu sans étincelle. B. L.

***Comparaison entre les moteurs diphasés et les moteurs triphasés.* — Mac Cornick.** — *Electrical World*, 9 juin 1906.

L'auteur a établi à l'American Institute une comparaison intéressante entre la valeur relative des moteurs diphasés et triphasés. Le problème posé est le suivant :

Etant données deux carcasses semblables sans enroulement, quelle différence y a-t-il entre des enroulements diphasés et triphasés au point de vue des avantages de fonctionnement ? Quelles sont les pertes comparatives si les deux machines ont la même puissance, ou, si les puissances sont différentes, quel est le moteur le plus avantageux ?

L'auteur discute le facteur de dispersion, la densité de courant dans le rotor et le stator, le facteur de variation de flux qui montre de combien le flux diffère de la forme sinusoïdale, et le facteur de distribution qui tient compte de l'effet, sur le voltage, du mode de distribution des enroulements dans les encoches.

Les principaux résultats auxquels l'auteur est conduit par cette étude détaillée peuvent être résumés de la façon suivante :

1° Une machine diphasée doit avoir 22 °/₀ de conducteurs de plus par encoche que la machine triphasée correspondante connectée en étoile et établie pour le même voltage et le même flux par pôle ;

2° Le courant magnétisant est le même dans les deux machines quand il est exprimé en pour cent du courant correspondant à la pleine charge ;

3° Les pertes dans le cuivre de la machine diphasée sont de 12 °/₀ plus élevées que celles de la machine triphasée ;

4° Le facteur de dispersion de la machine diphasée est de 25 °/₀ plus grand que celui de la machine triphasée.

Des machines établies pour le même nombre de phases et la même puissance et construites aussi semblablement que possible présentent souvent des caractéristiques différentes quand on les essaie. Ce fait rend difficile l'étude comparative expérimentale des machines diphasées et triphasées, spécialement au point de vue de leurs caractéristiques, qui diffèrent peu. Le rendement du moteur diphasé est un peu plus faible que celui du moteur triphasé, à cause des pertes plus élevées dans le cuivre : le glissement est plus grand pour la même tension et la différence atteint jusqu'à 30 °/₀. Le facteur de puissance est de 1 à 3 °/₀ plus faible dans le moteur diphasé, à cause du facteur de dispersion plus élevé.

R. R.

OSCILLATIONS HERTZIENNES & TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

***Contribution à la théorie de l'excitateur de Hertz et mesures de radiation faites sur des résonateurs.* — C. Schaefer et M. Laugwitz.** — *Drudes Annalen*, juin 1906.

Paetzold a publié dernièrement les résultats d'expériences sur des mesures de radiation faites sur des résonateurs. Il conclut de ses résultats que ceux-ci sont en contradiction avec ceux obtenus précédemment par Garbasso, Aschkinass et Schaefer, et il cherche à expliquer cette contradiction en affirmant que ces physiciens ont méconnu l'hypothèse généralement admise que l'excitateur de Hertz ne présente pas une oscillation propre déterminée, mais un spectre continu.

Une oscillation amortie pouvant toujours être considérée comme la superposition d'un nombre infini d'oscillations non amorties dont les fréquences sont les multiples de la fréquence fondamentale et dont les amplitudes vont en décroissant, on exprime identiquement la même chose

en disant que l'excitateur de Hertz émet une oscillation amortie ou en disant qu'il présente un spectre continu ayant une répartition d'énergie bien définie, et déterminée par la valeur de l'amortissement. Or, dans les travaux de Garbasso, Aschkinass et Schaefer, on voit nettement que ces auteurs envisagent aussi un spectre continu dans lequel la répartition de l'énergie est déterminée par l'amortissement. L'affirmation de Paetzold ne leur est donc pas applicable.

Les expériences de Paetzold ne sont d'ailleurs nullement en contradiction avec les anciennes expériences: elles ont seulement été faites en partie différemment. Là où Paetzold emploie les mêmes dispositifs expérimentaux que Aschkinass et Schaefer, il obtient exactement le même résultat que ces auteurs. Ces expériences étaient essentiellement les suivantes: les rayons de force électrique étaient rendus parallèles par un miroir creux ou par une lentille; au foyer d'un second miroir creux ou d'une seconde lentille était placé le résonateur de mesure; les rayons étaient polarisés linéairement par l'introduction d'une grille de Hertz; le faisceau de rayons était limité par un diaphragme métallique derrière lequel était placé le résonateur à grille. Ce dispositif représente exactement celui employé en optique pour les mesures d'absorption ou de transparence.

Une partie des expériences de Paetzold, qui précisément l'a conduit à ses doutes sur l'exactitude des expériences d'Aschkinass-Schaefer, a été faite avec un dispositif absolument différent. Dans ces expériences, les rayons n'étaient pas rendus parallèles; l'excitateur et le récepteur étaient simplement placés vis-à-vis l'un de l'autre, et des résonateurs à grille de dimensions importantes étaient placés entre eux. Il n'est pas surprenant que ces expériences aient donné d'autres résultats que celles d'Aschkinass et Schaefer, puisqu'elles ont été faites avec un dispositif entièrement différent.

Il est facile de voir qu'au total les expériences de Paetzold ne sont nullement en contradiction avec les anciennes, et que l'affirmation de cet auteur ne repose que sur un malentendu.

Les auteurs reviennent sur un point de l'étude de Paetzold relatif à la mesure de la radiation d'excitateurs secondaires. Comme tel, il faut comprendre un résonateur rectiligne mis en oscillations par un excitateur de Hertz. On étudie alors la radiation d'une grille réduite à un seul résonateur. Dans ce cas, Paetzold obtient des courbes de résonance très aigues: il indique que, quand on approche à un centimètre du premier résonateur un second résonateur semblable, on ne peut pas constater la présence de deux maxima voisins, et il attribue ce résultat au degré insuffisant d'exactitude de ses expériences. Or, on peut montrer que, dans ce cas, il ne doit pas se produire deux maxima. Si l'on désigne par ω_1 la résistance, L_{11} le coefficient de self-induction, C_1 la capacité de deux résonateurs absolument identiques, i_1 et i_2 leurs intensités de courant, on a les équations différentielles:

$$\left.\begin{aligned} \frac{d^2 i_2}{dt^2} + \frac{\omega_1}{L_{11}}\frac{di_1}{dt} + \frac{i_1}{L_{11}C_1} &= -\frac{L_{12}}{L_{11}}\frac{d^2 i_2}{dt^2}, \\ \frac{d^2 i_2}{dt^2} + \frac{\omega_1}{L_{11}}\frac{di_2}{dt} + \frac{i_2}{L_{11}C_1} &= -\frac{L_{12}}{L_{11}}\frac{d^2 i_1}{dt^2}. \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

On suppose toutefois que l'un des résonateurs (par exemple i_1) est excitateur et le second (i_2) excité: il y a, par suite, une dissymétrie, de sorte que l'on ne doit pas poser $i_1 = i_2$. L'intégrale générale peut être écrite sous la forme

$$\left.\begin{aligned} i_1 &= e^{-\alpha_1 t} A \cos 2\pi\left(\frac{t}{T_1} + \delta_1\right) + e^{-\alpha_2 t} B \cos 2\pi\left(\frac{t}{T_2} + \delta_2\right), \\ i_2 &= e^{-\alpha_1 t} A \cos 2\pi\left(\frac{t}{T_1} + \delta_1\right) - e^{-\alpha_2 t} B \cos 2\pi\left(\frac{t}{T_2} + \delta_2\right), \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

où A, B, δ_1, δ_2 sont des constantes d'intégration et

$$\left.\begin{aligned} T_1 &= 2\pi\sqrt{(L_{11} + L_{12})\,C_1}, \\ T_2 &= 2\pi\sqrt{(L_{11} - L_{12})\,C_1}, \\ \alpha_1 &= \frac{\omega_1}{2\,(L_{11} + L_{12})}, \\ \alpha_2 &= \frac{\omega_1}{2\,(L_{11} - L_{12})}. \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

Les équations (2) montrent que les deux résonateurs possèdent une forme d'oscillations, produite par les superpositions des oscillations amorties de périodes T_1 et T_2.

Cependant ici il en est tout autrement. Ce n'est pas un des résonateurs (i_1) qui excite l'autre (i_2), mais tous deux sont excités par un oscillateur éloigné. En appelant ν la fréquence de l'oscillation de l'excitateur, on a:

$$\left.\begin{aligned}\frac{d^2 i_1}{dt^2}+\frac{\omega_1}{L_{11}}\frac{di_1}{dt}+\frac{i_1}{L_{11}C_1}=-\frac{L_{12}}{L_{11}}\frac{d^2 i_2}{dt^2}+Ae^{\nu i t},\\ \frac{d^2 i_2}{dt^2}+\frac{\omega_1}{L_{11}}\frac{di_2}{dt}+\frac{i_2}{L_{11}C_1}=-\frac{L_{12}}{L_1}\frac{d^2 i_1}{dt^2}+Ae^{\nu i t}.\end{aligned}\right\} \quad (4)$$

Il est évident à priori que l'on doit avoir ici $i_1 = i_2$ car il n'existe aucune dissymétrie, quelle qu'elle soit ; on peut donc poser $i_1 = i_2 = J$ et l'on obtient

$$\frac{d^2J}{dt^2}\left(1+\frac{L_{12}}{L_{11}}\right)+\frac{\omega_1}{L_{11}}\frac{dJ}{dt}+\frac{J}{L_{11}C}=Ae^{\nu i t}, \quad (5)$$

dont l'intégrale a la forme

$$J = i_1 = i_2 = \frac{Ae^{i(\nu t-\psi)}}{\sqrt{(\nu_0^2-\nu^2)^2+\frac{\omega_1^2\nu^2}{(L_{11}+L_{12})^2}}} \quad (6)$$

$$\text{où } \nu_0^2 = \frac{1}{(L_{11}+L_{12})C_1}; \quad \text{tg}\,\psi_2 = \frac{\frac{\omega_1\nu}{L_{11}+L_{12}}}{\nu_0^2-\nu^2}. \quad (7)$$

En séparant la partie imaginaire, on a :

$$i_1 = i_2 = \frac{A\cos(\nu t-\psi)}{\sqrt{(\nu_0^2-\nu^2)+\frac{\omega_1^2\nu^2}{(L_{11}+L_{12})^2}}}. \quad (8)$$

L'oscillation commune maxima ne se produit que pour une période qui, pour une faible valeur de ω_1, est égale à $\nu_0/2\pi$; la courbe de résonance a, par suite, un seul maximum, ce qui concorde avec toutes les mesures et théories déjà publiées par l'un des auteurs.

R. V.

ÉCLAIRAGE

Sur l'éclat de corps noirs incandescents. — **W. Nernst.** — *Physikalische Zeitschrift*, 1er juin 1906.

On possède peu de données sur la quantité de lumière radiée par millimètre carré par un corps incandescent, noir au sens donné par Kirchhoff, quoique cette grandeur présente un intérêt technique et pratique considérable. D'après Lummer et Pringsheim, la radiation noire d'une surface d'un millimètre carré est de 0,0042 bougie Hefner à 1 449° absolus, 0,022 bougie à 1 597° absolus, 0,064 bougie à 1 707° absolus. En outre, l'auteur a déjà indiqué que, à la température de fusion du platine, la radiation noire atteint 0,91 bougie par millimètre carré.

L'auteur s'est proposé d'étudier complètement cette question pour un intervalle de températures assez considérable. Il a employé comme corps noir un cylindre fermé à une extrémité et noirci avec de l'oxyde de manganèse, placé dans un tube chauffé en platine, platine irridié ou iridium. Un pyromètre de Wanner soigneusement étalonné servait aux mesures ; dans cet étalonnage, on avait admis que le point de fusion de l'or est de 1 064 + 273 degrés absolus et que la constante de la loi de radiation de Wien-Planck a pour valeur 14600. La détermination de l'émission lumineuse était faite au moyen de corps incandescents dont l'épaisseur était exactement connue et qui avaient été très soigneusement photométrés à plusieurs reprises pour différentes intensités de courant au laboratoire de l'A. E. G.: une fente de 1 centimètre de largeur permettait de prendre l'émission lumineuse d'une portion moyenne de 1 centimètre de longueur de ce corps incandescent. Cette partie moyenne était placée, pour la mesure, tout près de l'ouverture du four électrique, et l'on modifiait l'intensité du courant jusqu'à ce que le corps incandescent présentât le même éclat que le corps noir placé à l'intérieur du four : l'égalité d'éclat était déterminée au moyen d'une lunette. Ces corps incandescents étaient formés par un mélange d'oxyde de thorium et de mousse de platine : leur diamètre était de 0,5 à 1 millimètre. Pour les températures plus élevées, l'auteur a employé des bâtonnets électrolytiques.

Le tableau I indique les résultats obtenus avec différentes baguettes de platine : pour permettre la comparaison, ce tableau contient aussi les résultats obtenus, d'une tout autre manière, par Lummer et Pringsheim : ces résultats sont marqués d'un astérisque. Dans ce tableau, ainsi que dans les suivants, K désigne l'émission lumineuse en bougies Hefner par millimètre carré et T la température absolue.

TABLEAU I

K	R calc.	T calc.	DIFFÉRENCE
0,0042*	1 449*	1 450	— 1
0,0038	1 462	1 441	+ 11
0,0241	1 596	1 607	— 9
0,022*	1 597*	1 598	— 1
0,053*	1 693	1 690	+ 3
0,064*	1 707*	1 710	— 3

Le tableau II indique les chiffres obtenus avec

un bâtonnet électrolytique de 1mm,08 d'épaisseur.

TABLEAU II

K	T calc.	T obs.	DIFFÉRENCE
0,66	2 027	2 025	+ 2
1,80	2 182	2 197	— 15
2,72	2 290	2 276	+ 14

Enfin le tableau III indique des résultats, peut-être un peu moins exacts, obtenus avec des bâtonnets de 0mm,37, 0mm,37, 0mm,67 et 1mm,08 d'épaisseur (nos I, II, III, IV).

TABLEAU III

N° DU BATONNET	K	T obs.	T calc.	DIFFÉRENCE
I	0,52	2 013	1 986	+ 27
II	0,81	2 077	2 057	+ 20
IV	1,00	2 097	2 092	+ 5
II	1,11	2 101	2 109	— 8
IV	1,12	2 101	2 111	— 10
III	0,88	2 104	2 070	+ 34
III	0,96	2 107	2 076	+ 31
IV	2,25	2 245	2 238	+ 7
III	2,50	2 284	2 258	+ 26

Comme l'ont indiqué Haber et Lucas, on peut évidemment considérer le spectre total comme l'étalement d'une longueur d'ondes moyenne (0μ,54 environ) et lui appliquer l'équation de Wien-Plauck, d'après laquelle l'éclat d'une raie spectrale de l'émission d'un corps noir, exprimée par la formule $\log K = -(A/T) + B$, croît avec la températmre.

Des résultats contenus dans les tableaux I et II, on déduit, pour les constantes A et B, les valeurs 11 230 et 5 367, d'où l'on tire la valeur de T :

$$T_{calc} = \frac{11\,230}{5,367 - \log_{10} K}.$$

On voit, d'après les différences entre les valeurs de $T_{obs.}$ et $T_{calc.}$ indiquées dans le tableau que cette formule donne des résultats qui concordent bien avec l'expérience.

L'équation établie permet de déterminer, d'après l'émission de lumière par millimètre carré, la température du corps incandescent supposé noir : pour les corps incandescents employés en pratique (carbone, osmium, tantale, corps électrolytiques), cette hypothèse est généralement exacte, surtout au bout d'un certain temps de fonctionnement. Le tableau suivant indique les températures absolues correspondant à l'émission lumineuse K.

K	T	K	T
0,005	1 464	4,0	2 357
0,01	1 524	6,0	2 446
0,05	1 685	8,0	2 516
0,1	1 764	10,0	2 571
0,5	1 982	12,0	2 619
1,0	2 092	15,0	2 680
2,0	2 217	20,0	2 763

Le fait qu'un corps photométrique incandescent réalise directement un pyromètre assez exact a déjà été indiqué par l'auteur : ce principe a d'ailleurs été utilisé par Holborn et Kurlbaum dans leurs pyromètres. Ce principe est d'une application tout à fait facile, si l'on n'emploie pas, comme Holborn et Kurlbaum, une petite lampe à vide, mais un bâtonnet incandescent à l'air libre de diamètre exactement connu. Pour les températures très élevées, les corps incandescents électrolytiques sont particulièrement recommandables car, après avoir fonctionné pendant 24 heures au voltage normal, ils donnent pendant des centaines d'heures, quand on les fait fonctionner à un voltage inférieur, une lumière extrêmement constante. Les bâtonnets d'un ampère (1 millim. d'épaisseur) sont particulièrement recommandables, au point de vue de leur étalonnage exact et de leur insensibilité aux courants d'air. La relation entre l'émission lumineuse par millimètre carré et l'intensité de courant i, pour le bâtonnet de 1mm,08, est donnée par les chiffres du tableau suivant :

i =	0,45	0,50	0,60	0,75	1
K =	0,66	1,00	1,46	2,54	4,83

Par interpolation graphique, on peut en déduire les émissions lumineuses correspondant à différentes intensités de courant.

L'auteur avait trouvé précédemment que, pour la température de fusion du platine, un corps noir émet 0,91 bougie par millimètre carré.

Si l'on suppose, avec Wartemberg, que cette température est de 2018°, on trouve par le calcul une émission de 0,634 bougie seulement. La détermination précédente ayant été faite dans un four en iridium, il est vraisemblable que le point de fusion avait été élevé par la présence d'un peu d'iridium dans la platine. Pour l'émission lumineuse à la température de fusion de l'iridium, l'auteur avait trouvé précédemment 12,1, d'où l'on déduit une température de 2 621° absolus de 2 348° ordinaires.

En ce qui concerne les étalons employés en photométrie, on se sert généralement de lampes à incandescence étalonnées. L'auteur propose de définir la bougie Hefner en déterminant la température du corps noir pour laquelle l'émission d'un millimètre carré est précisément égale à une bougie. D'après les résultats qui précèdent, cette température serait de 2 092° absolus ou 1819° ordinaires. A cette température, la composition de la lumière est à peu près la même que celle des nouvelles sources lumineuses électriques, en comparaison desquelles la lumière Hefner serait fortement rouge. Dans les laboratoires centraux, on pourrait facilement réaliser cet étalon. Comme étalon pratique et transportable, on pourrait adopter des lampes à osmium de 2 volts alimentées par un petit accumulateur muni d'un voltmètre de précision. La lampe à osmium non poussée donne une lumière blanche propre aux usages photométriques, et l'étalon ainsi réalisé offre l'avantage de ne pas dépendre d'un réseau électrique ou d'une installation fixe.

E. B.

ÉLECTROCHIMIE

Progrès réalisés en 1905 dans l'industrie électrochimique et électrométallurgique. — **F.-S. Spiers.** — *Electrical Review.*

L'auteur passe en revue les progrès réalisés dans le courant de l'année 1905 dans la grande industrie et dans les nouvelles méthodes de fabrication des produits chimiques.

En ce qui concerne la fabrication du fer et de l'acier, le procédé électrique est passé du domaine du laboratoire au domaine de la pratique. En Angleterre, on n'emploie le procédé électrique que pour des aciers spéciaux que l'on fabriquait précédemment dans le four Siemens-Martin. Avec le procédé Héroult, on a préparé quatre tonnes d'acier : un four mélangeur de 300 tonnes à chauffage électrique a aussi été établi pour uniformiser le contenu de 5 à 6 cornues Bessemer. Plusieurs installations exploitant ce procédé et représentant une puissance de 13000 chevaux ont été établies en Savoie : d'autres ont été établies en Amérique et au Canada. Dans ce dernier pays, on emploie aussi le procédé Galbraith. Les installations de fours Kjiellin à Gysinge et de fours Gin sont connues. Un nouveau procédé, dû à Johnson, permet de séparer le fer électrolytiquement en partant de solutions diluées.

La fabrication d'alliages de fer au moyen de différents procédés a pris une extension considérable. Une usine française de 15 000 chevaux produit par mois 250 tonnes de ferrosilicium, 80 tonnes de ferrochrome, 150 tonnes de métal manganosiliceux (40 °/₀ Mn et 24 °/₀ Si). En Amérique on prépare au four électrique du silicium pur par réduction du carbone, du ferro-vanadium et du ferro-titanium.

La préparation électrolytique du cuivre est tout à fait générale : annuellement on traite ainsi 130000 tonnes de métal. La méthode de Bodländer et Idasrewski pour la préparation du cuivre par électrolyse du sulfure de cuivre fondu n'a reçu encore aucune application pratique.

Les méthodes expérimentées jusqu'à présent pour la préparation électrolytique du nickel ont été abandonnées à nouveau. Récemment, la Orford Copper C° a entrepris des expériences pour la préparation électrolytique de ce métal au moyen de solutions de chlorures.

Le plus grand débouché du four électrique réside dans la fabrication de l'aluminium : une expérience de dix années dans les usines du Niagara de la Pittsburg Reduction C° a permis de dire que ces procédés font actuellement partie de l'industrie ordinaire. Dans le courant de l'année 1905, les usines d'aluminium du globe ont produit 12000 tonnes de ce métal : la demande croît toujours, et l'on atteindra bientôt un chiffre double comme production. L'aluminium reçoit des applications de plus en plus variées : l'alumino-thermie en absorbe déjà une assez grande quantité. Le procédé de fabrication a été très simplifié. D'après une méthode due à Bett, on peut transformer directement le minerai en métal sous forme d'un alliage avec du cuivre, du fer ou du zinc.

Une méthode a été aussi indiquée par Bett pour la préparation électrolytique du plomb : cette méthode a été appliquée au Canada dans une usine qui produit journellement 50 tonnes de métal. Le plomb est obtenu par l'électrolyse d'une solution en mouvement, qui contient 5 °/₀ de fluosilicate de plomb et 10 °/₀ d'acide fluorhydrique.

La préparation électrolytique d'antimoine et de zinc n'est pas sortie du domaine du laboratoire : on a indiqué que de Laval obtient en Suède, par voie électrolytique, du zinc pur contenant seulement 0,1 °/₀ de plomb, mais il est probable qu'il s'agit là seulement d'un procédé de purification du métal et non d'un procédé de traitement du minerai. Dernièrement, O. Brown et Oesterle ont étudié, en laboratoire, un procédé intéressant. Dans un four électrique à chauffage par résistance, on place 4 kilogrammes de blende, $2^{kgr},25$ de chaux et $0^{kgr},84$ de charbon et on fait passer pendant 7 heures un courant de 172 ampères sous 68 volts. Les vapeurs de zinc qui se dégagent sont conduites par un tube en charbon dans un condenseur où elles se déposent. Le résidu ne contient presque pas de zinc.

On doit mentionner la préparation, faite dans des usines américaines, d'oxydes supérieurs des métaux alcalins. La Niagara Chemical C° produit ainsi de l'oxone, oxyde de sodium dont 1 kilogramme traité avec de l'eau produit 130 litres d'oxygène. Une autre usine produit électriquement des peroxydes de calcium, de magnésium et de zinc qui peuvent servir à la fabrication d'oxygène. Le procédé indiqué par Kelly pour l'électrolyse du sulfate de sodium en vue de préparer du sodium et de l'acide sulfurique n'a pas été employé en pratique.

En ce qui concerne la préparation de l'étain, la méthode du Dr Mennicke a des chances de succès. On obtient le métal par électrolyse d'une solution contenant de l'acide fluorhydrique.

Le phosphore est préparé d'après la méthode de Hempel dans le four électrique par fusion de phosphate de calcium, de terre et de charbon de bois : on obtient un produit contenant 92 °/₀ de phosphore. D'après Stock et Siebert, on peut produire de l'arsenic au moyen d'un arc électrique jaillissant entre une électrode d'antimoine arsénieux et une électrode de charbon. L'arsenic qui se volatilise est condensé et cristallisé. Enfin, on peut citer la préparation, au moyen du four électrique, de l'osmium et du tantale, métaux employés pour la fabrication des nouvelles lampes connues à filament métallique.

Une toute nouvelle branche de l'industrie électrochimique est la préparation de produits azotés au moyen de décharges électriques dans l'air. En premier lieu on doit citer le procédé Birkeland-Eyde dans lequel un arc électrique jaillit entre des électrodes en cuivre refroidies par circulation d'eau et placées dans un champ magnétique. Ce système a été déjà décrit [1]. Une autre méthode, due à Franck, et employée en Italie, consiste à préparer du cyanure de calcium en chauffant du carbure de calcium dans un courant d'azote.

La préparation du carbure de calcium marque un temps d'arrêt, si ce n'est un recul. Dans l'année courante, on a produit en tout 100000 tonnes. En Angleterre, il n'y a pas une seule usine en fonctionnement. Un nouveau débouché pour l'acétylène est créé par la soudure oxy-acétylénique. Au contraire, la consommation de carborundum augmente, ainsi que celle du graphite. On doit signaler aussi l'avenir du cryptol pour le chauffage électrique.

R. R.

L'équivalent électrochimique de l'argent. — **K.-E. Guthe.** — *Drudes Annalen*, juin 1906.

L'auteur rappelle une série d'expériences faites par lui avec différentes intensités de courant et avec différents types de coulombmètres à argent. Les résultats obtenus pour des quantités d'électricité égales sont résumés dans le tableau suivant et montrent nettement qu'avec une intensité de 0,2 ampère pendant 5 heures, on obtient un dépôt sensiblement plus considérable qu'avec une plus forte intensité et une plus faible durée.

Le fait que, pour une intensité de courant de 0,2 ampère, le dépôt est toujours plus considérable n'est pas surprenant. Le courant passait pendant cinq heures et, malgré toutes les précautions, un peu du liquide de l'anode se diffusait probablement à travers le vase poreux pendant la durée de l'expérience. Dans la première des quatre expériences, le liquide anodique était renouvelé toutes les dix minutes ; dans l'expé-

[1] Voir *Éclairage Électrique*, tome XLVI, 24 février 1906, page 297.

rience suivante il était renouvelé toutes les quinze à vingt minutes ; dans la dernière il était renouvelé toutes les demi-heures. L'augmentation du poids du dépôt avec la pénétration du liquide dans la partie poreuse est évidente. Le courant ne doit donc pas passer pendant plus de deux heures, durée qui dépend évidemment du grain du vase poreux.

INTENSITÉ DE COURANT en ampères.	FORME DE RICHARD	GRANDE ANODE avec VASE POREUX	FORME ORDINAIRE
0,5	4,09881	4,09888	4gr,10154
0,5	4,09906	4,09891	4 10098
0,5	4,09870	»	»
1,0	4,09881	»	4 10016
1,0	4,09896	»	4 10056
1,5	4,09897	4,09880	»
Moyenne.	4,09888		4 10081
0,2	4,09920	4,09952	»
	4,09955	4,09985	»
	4,09959	4,09962	»
	4,09993	»	»

Pour l'électrolyse de faible durée (1 à 1,5 ampère), le tableau donne la valeur moyenne de 4gr,09888 pour le coulombmètre à vase poreux et 4gr,10036 pour le coulombmètre à papier filtre : il y a là une différence de 0,036 °/₀. Pour une durée de deux heures, les valeurs correspondantes sont 4gr,09887, 4gr,10126 et 0,058 °/₀.

Les expériences faites par Van Dijk ont confirmé les résultats de l'auteur, et la différence en °/₀ obtenue par cet expérimentateur pour de courtes durées du passage du courant concorde avec les chiffres trouvés par l'auteur. Toutes ces expériences montrent que le coulombmètre à vase poreux présente encore toujours l'influence propre du liquide anodique. Les efforts doivent donc tendre à l'établissement d'un coulombmètre dont les indications soient indépendantes de l'intensité de courant et de la durée de l'expérience.

L'auteur a déterminé l'équivalent électrochimique de l'argent non en valeur absolue, mais par comparaison avec la force électromotrice d'un élément étalon de Weston : il avait d'abord pris comme base la valeur de l'élément étalon de Clark (1,434 volts à 15°). Après avoir fait une série d'expériences sur la f. é. m. de différents éléments étalons et trouvé que celle de l'élément Weston est de 1,01872 volt à 20°, il a obtenu, comme valeur de l'équivalent électrochimique de l'argent le chiffre de 1mgr,11773 par coulomb avec le coulombmètre à vase poreux, et de 1,11815 avec le coulombmètre à papier filtre : il y a donc une différence de 0,038 °/₀ entre les résultats donnés par les deux formes d'appareil.

E. B.

Électrode tournante pour l'analyse électrochimique. — **F.-M. Perkin.** — *The Electrician*, 15 juin 1906.

La cathode consiste simplement en une spirale de fil de platine. Il vaut mieux, cependant, employer du platine iridié qui est plus rigide. Le fil de platine employé dans l'électrode d'essais avait 1 millimètre de diamètre : actuellement l'auteur emploie un fil de même diamètre en alliage à 20 °/₀ d'iridium. La surface active totale de l'électrode est d'environ 23 centimètres carrés. L'anode consiste en un fil de platine de 1 millimètre enroulé en deux ou trois spires. La forme de la cuve à électrolyse est extrêmement simple et très commode. Les résultats obtenus avec cette forme de cathode dans l'analyse du cuivre sont indiqués par le tableau suivant :

$CuSO^4$ EMPLOYÉ	COURANT EN AMPÈRES	DIFFÉRENCE DE POTENTIEL	TEMPS MINUTES	CUIVRE DÉPOSÉ
0,0505	0,45 — 4,8	2,7 — 6	35	0,0498
0,1013	0,6 — 2,0	2,8 — 4,8	38	0,1005
0,1266	1,0 — 5,5	3,0 — 9	42	0,1253
0,1013	0,5 — 2,0	5,0 — 7,6	40	0,1009
0,1266	0,45 — 3,0	»	40	0,1266
0,1266	0,5 — 4,5	»	35	0,1263

Par suite du prix très élevé du platine, il est souvent nécessaire d'employer un métal moins coûteux pour la cathode. Une spirale de fil de nickel a donné toute satisfaction pour un certain nombre de métaux, tels que le cuivre, le zinc et le fer. Les métaux étaient traités par l'acide nitrique (cuivre) ou par l'acide chlorhydrique ou sulfurique (zinc et fer) : le nickel résiste très bien à l'attaque de ces acides. Evidemment, quand on emploie des électrodes de nickel, il est nécessaire de les peser avant chaque expérience. Avec

le platine, ce n'est pas absolument nécessaire, mais c'est une bonne précaution à prendre. Une électrode de nickel a déjà servi 15 fois à l'auteur sans présenter aucune détérioration.

Le platine est généralement considéré comme n'étant attaqué par aucun réactif sauf par l'eau régale. Cependant, quand on l'emploie comme anode dans les études électrochimiques, il n'est pas aussi stable qu'on le croit généralement, surtout si l'on adopte des densités de courant élevées. Par exemple, dans une solution de cyanure de potassium, le platine est nettement soluble, comme le montrent les chiffres suivants : une anode de platine ayant une surface d'environ 10 centimètres fut placée dans une solution à 4 °/₀ de cyanure de potassium et fut soumise à une densité de courant de 4 ampères pendant 35 minutes. Au bout de ce temps, le poids de l'électrode avait diminué de $0^{gr},0016$. Après une nouvelle immersion et passage d'un courant de 3 ampères pendant 50 minutes, le poids avait diminué de $0^{gr},0015$.

L'iridium, que l'on est parvenu à préparer à 99 °/₀ de pureté, n'est attaqué par aucun réactif : il est dur comme de l'acier et peut être placé dans l'eau régale bouillante sans attaque.

R. R.

MESURES

***Mesures électriques de la température.* — Northrup.** — *American Institute of Electrical Engineers*, mai 1906.

L'auteur passe en revue les différents moyens employés pour la réalisation de thermomètres électriques. La variation de résistance de métaux purs avec la température est plus grande que la variation de volume d'un gaz avec la température, et est vingt-deux fois plus grande que la variation de volume du mercure. Le coefficient de dilatation de l'azote est 0,0036738, et celui du mercure est 0,000180, tandis que le coefficient d'accroissement de résistance du nickel pur est d'environ 0,0041 par degré centigrade entre 0° et 100°. En outre, la variation de résistance électrique peut être mesurée avec une plus grande exactitude et une plus grande facilité qu'une variation de volume d'un liquide ou d'un gaz ; le degré d'exactitude auquel on peut atteindre facilement est de l'ordre du millionième. Au moyen du bolomètre, on peut, sans difficulté, apprécier des variations de température de l'ordre du dix millionième de degré.

La loi de la variation de résistance électrique du platine avec la température a été étudiée par Callendar et Griffith, ainsi que par quelques autres expérimentateurs. Soit p_t une température définie par la relation

$$p_t = \frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0} 100,$$

où R est la résistance d'un échantillon donné de platine à 0°, R_{100} la résistance à 100° et R_t la résistance à $t°$, la formule :

$$t - p_t = \delta \left[-\frac{t}{100} + \left(\frac{t}{100}\right)^2 \right]$$

exprime la différence entre la température t mesurée avec le thermomètre à air et la température du platine. Cette « formule de différence » contient un coefficient δ qui varie avec les différents échantillons de platine employés. Pour du platine très pur, il est égal à 1,5 environ : il est plus grand pour du platine impur. Pour déterminer δ, on mesure la résistance du thermomètre à trois températures connues, 0°, 100°, et 444,5°, point d'ébullition du soufre. La formule de différence permet de passer d'une température donnée par la résistance du platine à la température correspondante donnée par l'échelle du thermomètre à air.

Des recherches minutieuses ont été faites sur différents métaux propres à servir à la construction de thermomètres, en vue de déterminer la constance du coefficient de température de ces métaux. Ces expériences ont montré que le platine ou le nickel doivent être préférés aux autres métaux. L'auteur a employé beaucoup de thermomètres à fil de nickel pour des températures comprises entre — 40° et 300° ou 400° et a trouvé que ces appareils donnent des indications exactes et constantes. Le nickel offre l'avantage d'avoir un coefficient plus élevé que le platine pur : ce coefficient est d'environ 0,0041 par degré entre 0° et 100°, tandis qu'il est de 0,0039 pour le platine pur et de 0,002 pour le platine du commerce. Les résistances spécifiques du nickel pur et du platine pur sont dans le rapport de 933 à 1 000.

Pour les thermomètres employés pour des températures inférieures à 170°, on peut employer simplement un fil de nickel isolé pour un guipage de soie.

Les différentes méthodes employées pour mesurer la résistance d'après laquelle on détermine la température sont les suivantes :

a) Méthode du pont à fil ;

b) Emploi de ponts de Wheatstone ;

c) Méthode du pont double de Kelvin ;

d) Méthode de déviation directe, la f. é. m. étant maintenue constante ;

e) Méthode de déviation directe, indépendante du voltage par l'emploi d'un nouvel appareil de l'auteur nommé ratiomètre.

Les quatre premières méthodes sont connues. Le ratiomètre permet de mesurer, par une déviation directe, le rapport d'une quantité inconnue à une quantité connue. L'appareil, qui est employé avec un miroir pour obtenir une grande amplification de la déviation, repose sur le principe suivant (fig. 1). Deux bobines plates

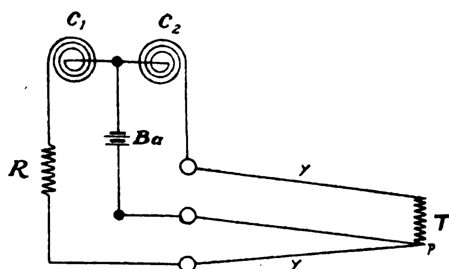


Fig. 1.

C_1 et C_2 sont montées sur le système mobile *abc*, et portent un cadre amortisseur en aluminium. Ces deux bobines ont la même polarité du même côté. Le système tourne entre deux pièces polaires en fer de polarité opposée formant un croissant que représente la figure 2. L'axe de rotation du système coïncide à peu près avec le centre du cercle extérieur du croissant. Quand le système tourne, une bobine se rapproche de la face polaire intérieure et l'autre s'en éloigne. Si des courants traversent les deux bobines, dans une direction convenable, le système atteint une position d'équilibre indépendante de la valeur des courants eux-mêmes et dépendant seulement du rapport des portions du courant principal qui se divise pour traverser les deux bobines. Les fils d'amenée du courant sont établis de façon à n'exercer qu'un couple négligeable sur le système mobile. Dès que le rapport des courants varie, le système atteint une nouvelle position d'équilibre indépendante du courant de la batterie.

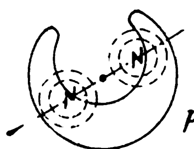


Fig. 2.

Dans le schéma de la figure 1, R désigne une résistance fixe, T la résistance variable avec la température, y un fil d'amenée du côté T que compense un fil semblable y du côté R afin de neutraliser la variation de résistance de ces conducteurs. Les déviations du miroir sont observées au moyen d'une lunette fixée sur la carcasse de l'instrument : l'échelle est tracée sur une feuille de celluloïd transparent et est graduée en ohms ou en degrés centigrades. Un faisceau lumineux est envoyé de la façon ordinaire sur le miroir de l'équipage mobile. La forme spéciale du cadre d'aluminium permet d'obtenir un bon amortissement. L'appareil est relié à deux ou trois éléments de pile sèche ou à une petite magnéto à main. Le ratiomètre peut être rendu sensible à des variations de température d'environ 0,1° ou moins.

R. R.

Sur un thermomètre électrique à résistance. — **Bruger.** — *Elecktrotehnische Zeitschrift*, 31 mai 1906.

On peut construire des thermomètres basés sur les variations de résistance spécifique que présentent différents conducteurs quand leur température varie. Entre des limites pas trop étendues, on peut représenter d'une façon suffisamment exacte la résistance d'un conducteur métallique par la formule $w_t = w_0 + w_0 \alpha t$, en appelant w_0 la résistance à 0°, w_t la résistance à $t°$ et α une constante nommée coefficient de température.

Il semble au premier abord qu'il soit avantageux de choisir un corps qui présente un coefficient de température élevé, le fer par exemple pour lequel $\alpha = 0{,}005$ environ. Le fer présentant aussi l'avantage d'être peu coûteux, des thermomètres à résistance ont été établis depuis 20 ans avec ce métal. Mais, en service pratique, ils ont présenté des défauts provenant de l'oxydation du fer, oxydation que les différents moyens tels que l'étamage, la galvanisation, l'émaillage, etc. n'ont pas pu empêcher. On fut donc conduit à employer le nickel qui possède un coefficient de température plus faible que le fer mais qui est inattaquable. Mais on se heurta à un autre inconvénient provenant de la différence des cons-

tantes électriques de différents échantillons de nickel, différence qui se traduisait par des différences de 10 % dans les coefficients de température.

L'expérience acquise a montré que le corps employé pour la constitution du thermomètre à résistance doit avant tout être invariable en fonctionnement permanent et pouvoir être obtenu toujours avec des mêmes constantes électriques : l'obtention d'un coefficient de température élevé et d'un faible prix est secondaire. Les conditions ne sont guère remplies que par le platine que l'on peut obtenir très pur et avec un coefficient de température bien constant. Le prix élevé de ce métal importe peu, puisqu'on n'en emploie qu'une faible quantité sous forme d'un fil fin : on bénéficie, en outre, de l'avantage d'une grande simplicité d'étalonnage.

Les thermomètres à résistance construits avec du platine par Hartmann et Braun sont formés d'une lame de mica sur laquelle est enroulé un fil double de platine couvrant la moitié de sa hauteur. La lame de mica est supportée par une tête isolante à laquelle sont fixées les bornes, reliées aux extrémités du fil par deux bandes minces de cuivre. Le tout est enveloppé d'un tube protecteur, généralement en tôle perforée. La période de refroidissement d'un tel appareil ne dure pas plus de 15 à 20 secondes, chiffre très inférieur à ceux présentés par le thermomètre à mercure,

Cet appareil peut être combiné avec un milliampèremètre et une source de courant, mais, dans ce cas, les indications dépendent aussi de la différence de potentiel aux bornes de celle-ci qui présente toujours des variations non négligeables. Il vaut mieux employer une méthode de mesure de résistance au moyen du pont de Wheatstone, et déplacer le curseur d'une résistance réglable jusqu'à ce que le galvanomètre soit au zéro. Un index se déplaçant sur une échelle indique alors directement la température.

Quand il s'agit d'obtenir un appareil indiquant d'une façon permanente la température, le problème est plus difficile à résoudre. La société Hartmann et Braun y est cependant parvenue en établissant un appareil du type à bobine mobile indiquant directement le rapport de deux courants dont l'un ne dépend que de la différence de potentiel agissante et dont l'autre dépend de la résistance du thermomètre : on mesure donc directement cette résistance comme valeur du rapport e/i.

Le principe de l'appareil est le suivant. Dans un champ magnétique fixe non uniforme produit par un aimant permanent à masses polaires alésées cylindriquement et à noyau central de section ovale, est placé un système comprenant deux bobines en croix fixées rigidement l'une à l'autre et munies d'un axe central autour duquel elles peuvent tourner facilement. Les deux bobines sont reliées en parallèle à la source de courant ; le circuit de l'une contient une résistance invariable, et le circuit de l'autre contient la résistance du thermomètre. Le pas d'enroulement est tel que les deux bobines tendent à se déplacer en sens inverses sous l'effet des courants agissants. Le couple total est alors $i_1H_1 - i_2H_2$, en appelant i_1 l'intensité du courant dans la bobine I, i_2 l'intensité de courant dans la bobine II et H_1 et H_2 les deux composantes du champ intervenant pour les deux bobines. Si la bobine I est en circuit avec une résistance invariable w et la bobine II en circuit avec la résistance variable x du thermomètre, et si l'on désigne par α_1 l'angle que forme la bobine I avec un plan fixe et par α_2 l'angle que forme la bobine II avec ce plan, on peut écrire, pour le couple total :

$$H \cdot f(\alpha_1) \cdot \frac{e}{w} - Hf(\alpha_2) \cdot \frac{e}{x},$$

H étant l'intensité de champ dans le plan pris pour origine des angles α et α_2. Ces angles diffèrent d'une quantité fixe qui est l'angle invariable de deux bobines. Le système se place dans une position telle que le couple soit nul : on peut donc écrire :

$$H \cdot f_1(\alpha_1) \cdot \frac{e}{w} - Hf_2(\alpha_1)\frac{e}{x} = 0$$

ou

$$x = \frac{wf_2(\alpha_1)}{f_1(\alpha_1)} = wf(\alpha_1).$$

On voit donc que l'angle α_1 est une fonction de x et est indépendant de la différence de potentiel agissante. La graduation de l'échelle dépend des fonctions $f_1(\alpha_1)$ et $f_2(\alpha_1)$, c'est-à-dire de la répartition des lignes de force magnétiques dans le champ fixe, répartition déterminée par la forme du noyau de fer. Pour augmenter la sensibilité aux faibles températures, on peut, comme on le voit facilement par un calcul théorique, ajouter à la bobine I une petite bobine auxiliaire de cou-

ple opposée intercalée dans le circuit de la bobine II.

L'auteur termine en indiquant l'emploi des thermomètres à résistance pour les indications à distance et la possibilité, grâce à l'emploi d'appareils ayant tous la même constante, de relier successivement les différents appareils à un seul galvanomètre. Dans ce cas, on emploie des thermomètres de résistance relativement élevée, pour que la résistance de la ligne de jonction puisse être négligée en comparaison de celle-ci.

E. B.

DIVERS

Influence du polissage sur les propriétés isolantes du bois. — **Wernicke.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 17 mai 1906.

Il semblait que le polissage améliore sensiblement les propriétés isolantes du bois en le rendant moins sensible à l'humidité. L'auteur a donc été amené à étudier l'influence exacte du polissage sur un certain nombre de poignées d'interrupteur en bois. L'un des pôles de la tension d'essais était relié à une feuille d'étain enveloppant la partie extérieure de la poignée ; le boulon intérieur en fer traversant cette poignée était relié à l'autre pôle. Les poignées étaient en noyer. La première série d'essais fut faite avec des poignées ayant les dimensions suivantes :

Longueur de la poignée. . .	105	millimètres.
Diamètre extérieur en haut.	35	—
— en bas. .	23	—
Diamètre du trou.	9	—

Les poignées polies et non polies tinrent 4000 volts pendant une demi-heure. La poignée polie tint 6000 volts pendant une demi-heure ; la poignée non polie présenta un court-circuit au bout de 5 minutes.

Deux poignées semblables furent séchées pendant 3 heures à 30° et pendant 12 heures à 15°. La tension d'essais fut portée à 7000 volts. La poignée polie fut percée au bout de 22 minutes : la poignée non polie fit un court-circuit au bout de 3 minutes.

La deuxième série d'essais fut faite avec des poignées de 100 millimètres de longueur, de 35 et 22 millimètres de diamètre, et de 10 millimètres d'alésage. La poignée non polie tint 6000 volts pendant 15 minutes, 7000 volts pendant 15 minutes et 8500 volts pendant 5 minutes : elle ne fut pas percée. Elle fut percée au bout de 10 minutes à 9000 volts. La poignée polie fut percée à 8000 volts.

La troisième série d'essais fut faite avec des poignées de 120 millimètres de longueur, 40 et 25 millimètres de diamètre extérieur, et 8 millimètres d'alésage. La poignée non polie tint 6000 volts pendant une demi-heure ; la poignée polie fut percée à 6000 volts au bout de 25 minutes.

Les deux poignées furent suspendues pendant 100 heures à l'air, protégées contre la pluie. La teneur en humidité de l'air fut, pendant ce temps, de 70 à 90 °/₀ de la saturation complète. Ensuite les poignées furent essayées à 6000 volts. Celle qui n'était pas polie fut percée en une minute ; celle qui était polie le fut en dix minutes.

Pour vérifier les résultats qui précèdent, l'auteur fit de nouveaux essais sur des plaques en chêne et en érable, de 20 × 20 centimètres et de 1 centimètre d'épaisseur. Ces plaques portaient, sur chacune de leurs faces, une feuille d'étain de 10 × 10. Les résultats ont été les suivants :

Chêne : 6000 volts. La plaque non polie tint 3 minutes ; la plaque polie 12 minutes.

Érable : 6000 volts. La plaque non polie tint 15 minutes ; la plaque polie 5 minutes.

Ces plaques furent suspendues à l'air libre à l'abri de la pluie pendant 100 heures. Les résultats furent les suivants :

Chêne : 6000 volts. La plaque polie fut percée au bout de 3 minutes ; la plaque non polie le fut immédiatement.

Érable : 6000 volts. Les deux plaques ne tinrent ni l'une ni l'autre la tension d'essai ; la plaque polie fut percée plus rapidement que l'autre.

D'après ce qui précède, on voit que le polissage n'améliore pas les propriétés isolantes du bois. La plaque de chêne polie fut meilleure que la plaque non polie ; au contraire la plaque d'érable polie fut plus mauvaise que la plaque non polie. Pour les poignées en noyer, l'une ou l'autre est tantôt meilleure, tantôt plus mauvaise que l'autre. La façon dont les poignées sont percées par les tensions d'essai diffère suivant qu'elles sont polies ou non polies. Quand elles sont polies, la rupture se produit, en général, plus brusquement avec inflammation. Quand elles ne sont pas polies, la rupture est moins brusque.

E. B.

CHARTRES — IMPRIMERIE DURAND, RUE FULBERT.

Le Gérant : J.-B. Nouet.

Tome XLVIII. Samedi 28 Juillet 1906. 13e Année. — N° 30.

L'Éclairage Électrique

REVUE HEBDOMADAIRE DES TRANSFORMATIONS

Electriques — Mécaniques — Thermiques

DE

L'ÉNERGIE

ESSAIS RÉCENTS DE TURBO-ALTERNATEURS

La présente communication concerne des essais de turbo-alternateurs sortis récemment des *ateliers de construction Oerlikon*; elle est faite à un double point de vue :

1° Pour attirer l'attention sur les résultats particulièrement satisfaisants qui ont été obtenus quant aux qualités électriques des machines[1];

2° Au point de vue de la méthode employée, en particulier, pour la détermination des pertes, méthode qui s'adapte avec grande facilité au cas spécial de turbo-alternateurs, et dont les résultats que nous donnons légitiment l'emploi dans les essais industriels.

Le dernier turbo-alternateur ayant quitté la plateforme d'essais est un alternateur triphasé destiné à la *Compagnie électrique de la Loire,* à Saint-Etienne. Il est appelé à fonctionner sur un réseau de distribution de force motrice et de lumière dans l'usine génératrice de cette ville, et doit être entraîné directement par une turbine à vapeur, système Rateau, construite par la maison *Sautter Harlé et Cie*, à Paris. Pendant les essais, le moteur était une turbine à vapeur du même système, des *ateliers de construction Oerlikon*. La figure 1 donne une vue d'ensemble du groupe alternateur-excitatrice ; la figure 2 montre le stator ouvert et la tête des bobines induites ; la figure 3 représente le rotor isolé.

---

[1] On sait en effet que les avantages incontestés des turbo-alternateurs sous le rapport des frais d'installation ne sont pas toujours suffisants pour qu'on préfère ces groupes à des alternateurs commandés par machines à pistons, surtout lorsqu'il s'agit d'installations à marche permanente, et ce, à cause de l'idée que l'on se fait de l'infériorité de ces machines sous le rapport du fonctionnement électrique. Les chiffres qui suivent montreront que les qualités électriques des groupes essayés peuvent être mises en parallèle avec celles de bons alternateurs modernes, sans que les différences soient suffisantes pour que l'on puisse parler d'infériorité manifeste.

Les caractéristiques sont les suivantes :

Puissance en kilowatts	1 600 kw.
— en kilovolt-ampères, pour $\cos \varphi = 0{,}7$	2 300 kva.
— — pour $\cos \varphi = 0{,}67$	2 400 —
Surcharge	10 % pendant 3 heures.
Tension aux bornes	5 700 volts.
Vitesse	1 500 tours par minute.
Fréquence	50 pér. par seconde.
Excitatrice directement accouplée	90 à 100 volts, 200 amp.

Une des conditions de bon fonctionnement des alternateurs en général, surtout lors de la marche en parallèle de plusieurs unités, est l'absence d'harmoniques de l'onde fondamentale

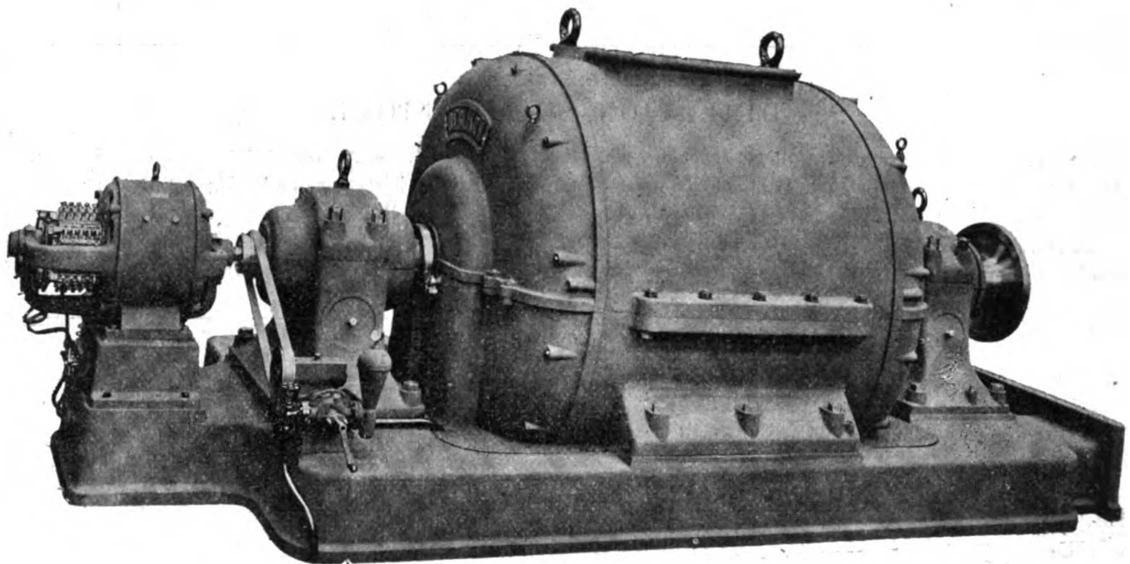


Fig. 1. — Turbo-alternateur de 1 600 kw. muni de son excitatrice, pour la Cie Électrique de la Loire.

dans la courbe de la force électromotrice induite, c'est-à-dire de la tension à vide. Dans les turbo-alternateurs d'Oerlikon, on évite la forme triangulaire du champ magnétique, en laissant vides, c'est-à-dire non remplies de matériel magnétique, les encoches non bobinées qui se trouvent au milieu de chacun des enroulements rotoriques en spirale constituant les pôles. La saturation ainsi obtenue des dents au voisinage de l'axe magnétique a également pour effet d'accentuer la courbure de la caractéristique à vide, et de la rapprocher ainsi de la caractéristique d'alternateurs ordinaires à pôles saillants, à faible chute de tension.

L'oscillogramme (fig. 4) relevé à l'oscillographe *Siemens et Halske* (1), montre que l'amplitude des harmoniques de la tension à vide atteint au plus 1 ou 2 pour 100 de l'amplitude de l'onde fondamentale.

Dans le même ordre d'idées, nous reproduisons aussi (fig. 5) une courbe instantanée relevée sur un turbo-alternateur de 250 kilowatts, 3 000 tours, bipolaire, au moyen du disque

(1) Cet appareil étant à notre disposition depuis quelques jours seulement, l'amortissement du système mobile n'avait pas encore pu être établi parfaitement ; les imperfections de la courbe sont donc encore trop accentuées.

de Joubert et d'un voltmètre de précision. Cette courbe ne diffère pas non plus sensiblement de la sinusoïde.

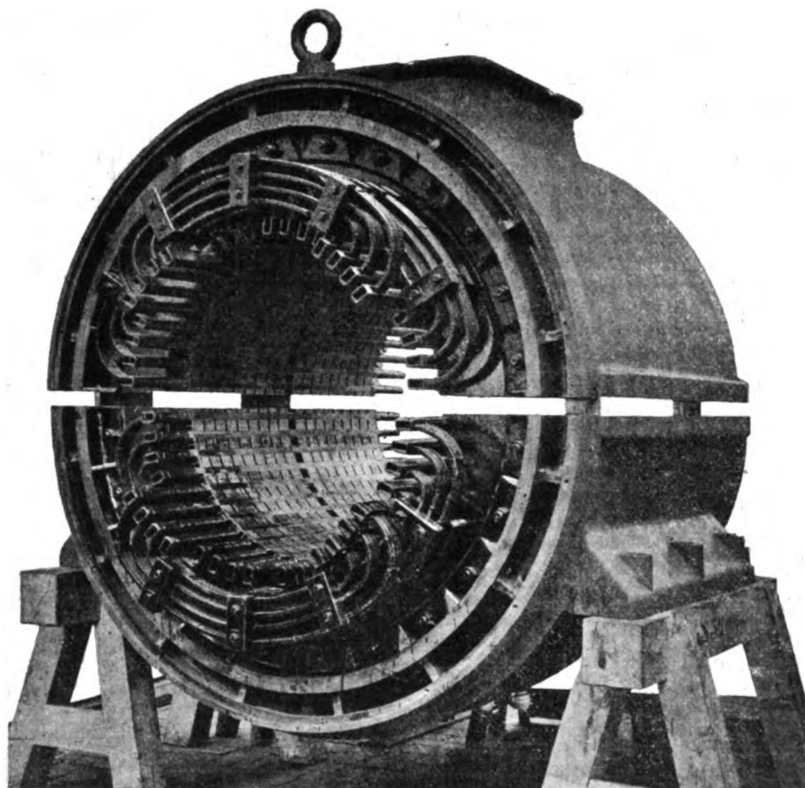


Fig. 2. — Turbo-alternateur de 1 600 kw.; stator.

Les caractéristiques de l'alternateur de 2 400 kilovolt-ampères, relevées à vide et en court-circuit, ainsi que la caractéristique en charge calculée d'après les deux précédentes, sont représentées dans le diagramme (fig. 6). Afin de donner quelques éclaircissements sur la

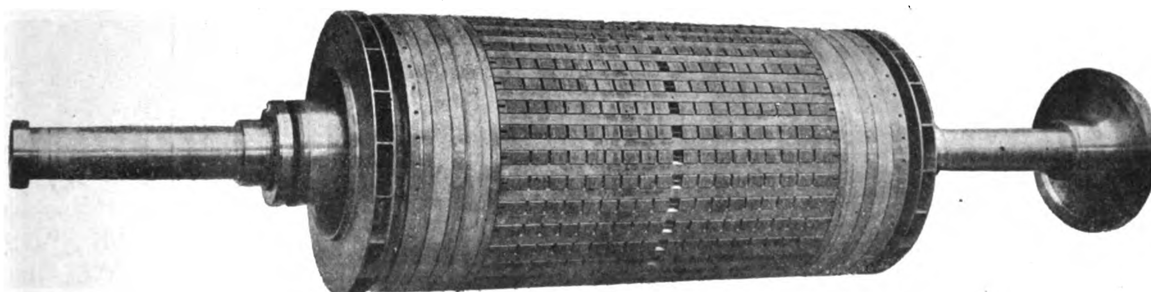


Fig. 3. — Turbo-alternateur de 1 600 kw.; rotor.

méthode employée pour le calcul de la courbe en charge, nous nous reportons à la figure 7, diagramme relatif à un turbo-alternateur triphasé de la même série, d'une puissance de 560 kilovolt-ampères, que l'on a pu charger sur moteur synchrone sous-excité ($\cos \varphi = 0$), et sur résistance liquide ($\cos \varphi = 1$). Après avoir mené Ad parallèle à la tangente Ot à l'ori-

gine de la caractéristique à vide, on cherche CD égal à la différence des ampère-tours supplé-

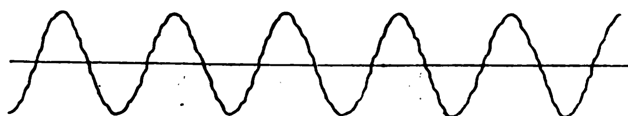


Fig. 4. — Turbo-alternateur de 2 400 kilovolt-ampères ; oscillogramme de la tension à vide.

mentaires en charge inductive AB et des ampère-tours de court-circuit OP. Il est facile de voir que DE représente la tension de réactance et EB les ampère-tours en opposition de l'induit.

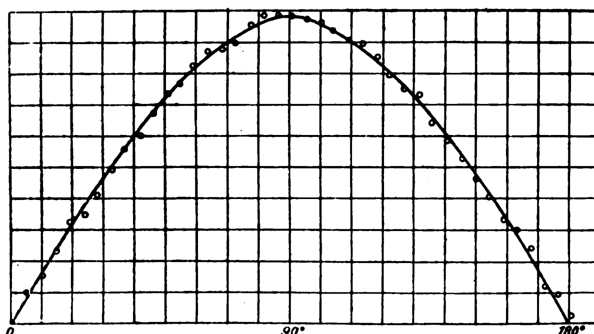


Fig. 5. — Turbo-alternateur de 250 kw., 3000 tours; courbe instantanée de la tension composée à vide.

Dans le cas présent, cette dernière valeur (EB = 4 150 amp.-tours) est très peu différente de la valeur calculée d'après la disposition et le nombre des spires (4 200 amp.-tours en

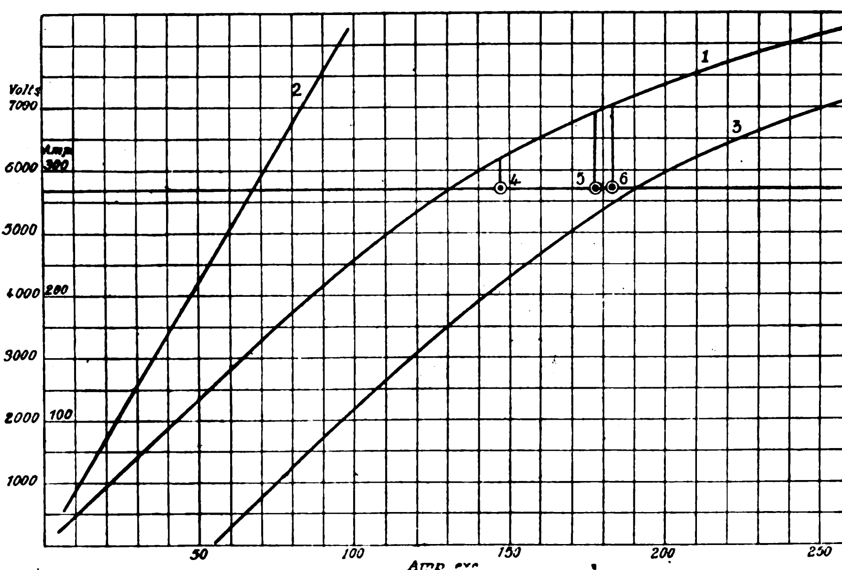


Fig. 6. — Turbo-alternateur triphasé, 2 300 à 2 400 tours, 5 700 volts, 1 500 tours. 50 périodes.
1, caractéristique à vide à 1 500 tours; 2, caractéristique en court-circuit; 3, caractéristique en pleine charge, cos $\varphi = 0$; 4, point de charge : 233 amp., cos $\varphi = 1$; 5, point de charge : 233 amp., cos $\varphi = 0{,}8$; 6, point de charge : 233 amp., cos $\varphi = 0{,}7$.

opposition). Quant à la tension de réactance DE, elle permet de calculer le coefficient de dispersion de l'induit, valable pour toutes les machines de mêmes proportions.

Une photographie du groupe turbo-alternateur de 560 kilovolt-ampères, auquel se rap-

porte ce diagramme, est reproduite figure 8. Ce groupe est destiné à travailler en parallèle avec les machines à vapeur existantes de l'usine d'électricité de Livourne, au voltage de 5000 — 5500, 3000 tours, 50 périodes.

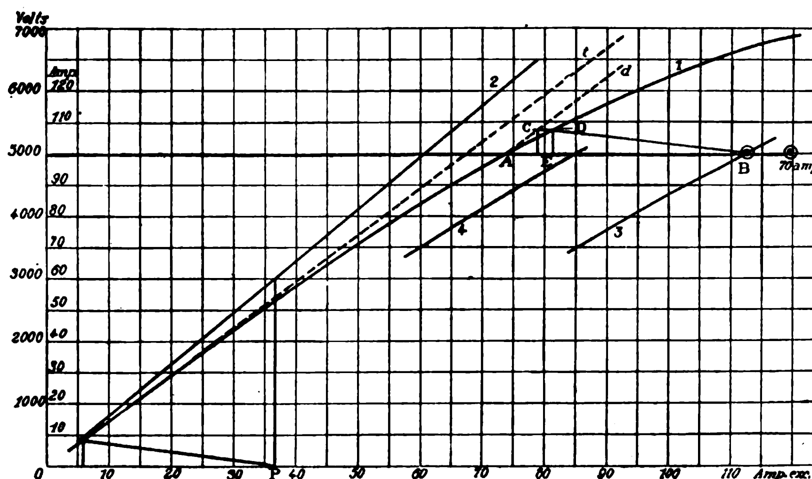


Fig. 7. — Turbo-alternateur triphasé, 5000 à 5500 volts, 560 kilovolt-ampères, 3000 tours, 50 périodes.
1, caractéristique à vide ; 2, caractéristique de court-circuit ; 3, caractéristique en charge : 60 ampères, cos $\varphi = 0$ (observée) ;
4, caractéristique en charge : 60 ampères, cos $\varphi = 1$ (observée).

C'est à l'aide des coefficients expérimentaux déterminés ci-dessus que la caractéristique en charge de la figure 6 a été déduite des caractéristiques à vide et en court-circuit. Il ressort de ces évaluations et de ces mesures que la dispersion d'induit et par suite la tension de réactance sont très faibles dans les turbo-alternateurs : cette dernière atteint seulement

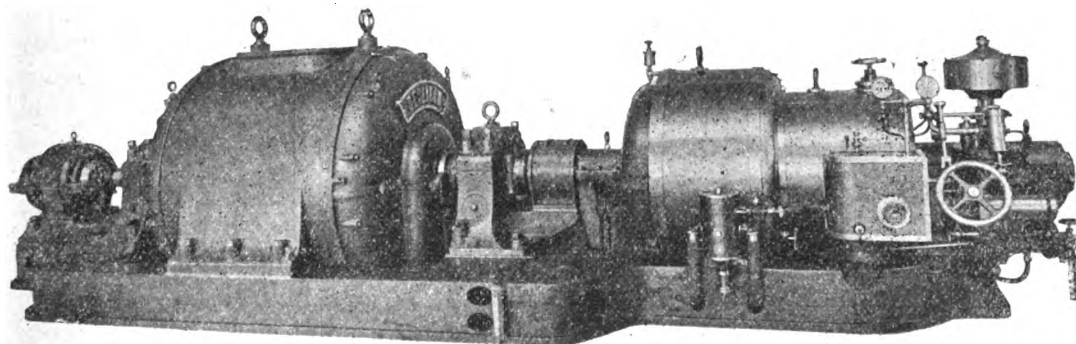


Fig. 8. — Groupe turbo-alternateur de 560 kilovolt-ampères pour Livourne.

7 à 8 °/₀ de la tension normale, tandis qu'il n'est pas rare de rencontrer de bons alternateurs ayant 15 °/₀ de dispersion d'induit.

Sur le même diagramme sont tracées les chutes de tension, à pleine charge et à la tension normale, pour cos $\varphi = 0,7$, cos $\varphi = 0,8$ et cos $\varphi = 1$, calculées d'après la méthode des trois vecteurs.

Leurs valeurs en pour cent de la tension normale sont les suivantes :

pour cos $\varphi = 1$: 8 °/₀
cos $\varphi = 0,8$: 21 °/₀
cos $\varphi = 0,7$: 23 °/₀.

Les caractéristiques de l'excitatrice du groupe de 2400 kilovolt-ampères sont données (fig. 9).

Les rendements ont été calculés par la méthode des pertes séparées. Les pertes elles-mêmes ont été évaluées par le tracé des courbes d'arrêt de l'alternateur muni de son excitatrice, dans différentes conditions de fonctionnement. Nous dirons quelques mots de cette méthode, pour justifier son emploi dans les circonstances actuelles.

La méthode de la courbe d'arrêt consiste, comme l'on sait, à entraîner la machine à un nombre de tours légèrement supérieur au nombre de tours normal, à débrayer, et à noter, à intervalles déterminés, les vitesses de la machine pendant la période d'arrêt.

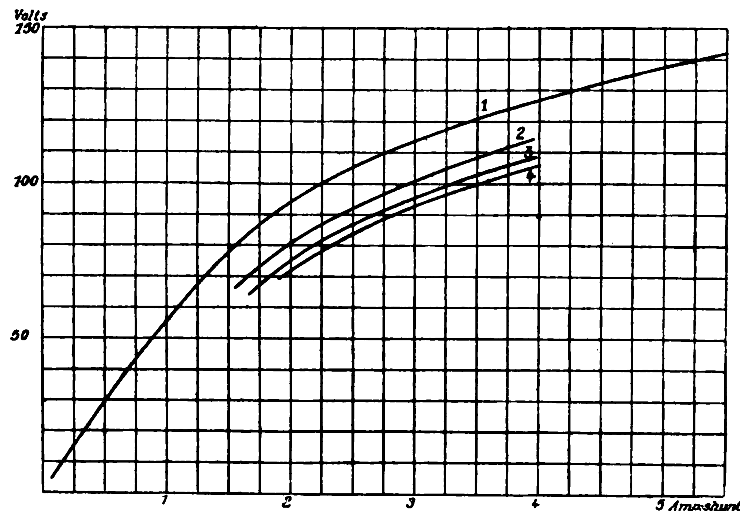


Fig. 9. — Turbo-excitatrice du groupe de 2400 kilovolt-ampères, 90/100 volts, 200 amp., 1500 tours.
1, caractéristique à vide, à 1500 tours; 2, caractéristique en charge : 120 amp.; 3, caractéristique en charge : 180 amp.; 4, caractéristique en charge : 200 ampères.

On fait usage de la relation :

$$\frac{dw}{dt} = \frac{M_d}{J} \qquad (1)$$

où $\omega = 2\pi n$ représente la vitesse angulaire,

J, le moment d'inertie des masses tournantes,

M_d, le moment retardateur correspondant aux pertes à mesurer.

Si l'on remarque que les tangentes à la courbe d'arrêt représentent dn/dt à chaque instant, que J peut être calculé d'après les données de construction, on peut tirer M_d de la relation (1). Les pertes en kilowatts sont liées au moment M_d, pour un nombre de tours n donné, par l'équation :

$$KW = \frac{2\pi n}{60} \cdot M_d \frac{0{,}736}{75}. \qquad (2)$$

La méthode est donc, en principe, extrêmement simple. Si son emploi est peu répandu, c'est qu'elle n'est commode et exacte que dans certaines conditions qui ne sont pas toujours réalisées dans les essais courants. Il résulte de la formule (1), en effet, que la détermination exacte de J a une importance capitale. Or cette détermination est incommode à faire avec l'approximation désirable, dès que les masses tournantes ne sont pas de forme simple, et c'est le cas de presque toutes les machines à inducteur tournant et à pôles saillants. Les asses tournantes dont sont formés les rotors des turbo-alternateurs, au moins les masses rincipales, ont au contraire des formes extrêmement simples.

L'exactitude exige ensuite que le temps d'arrêt soit assez long, pour que les erreurs commises sur la lecture du nombre de tours soient insignifiantes, même si l'on fait usage d'un tachymètre ordinaire.

Il faut enfin pouvoir débrayer en vitesse. C'est le cas des turbo-alternateurs, qui sont le plus souvent disposés pour accouplement direct, au moyen d'un manchon élastique à broches à déplacement longitudinal, ou d'un manchon à friction.

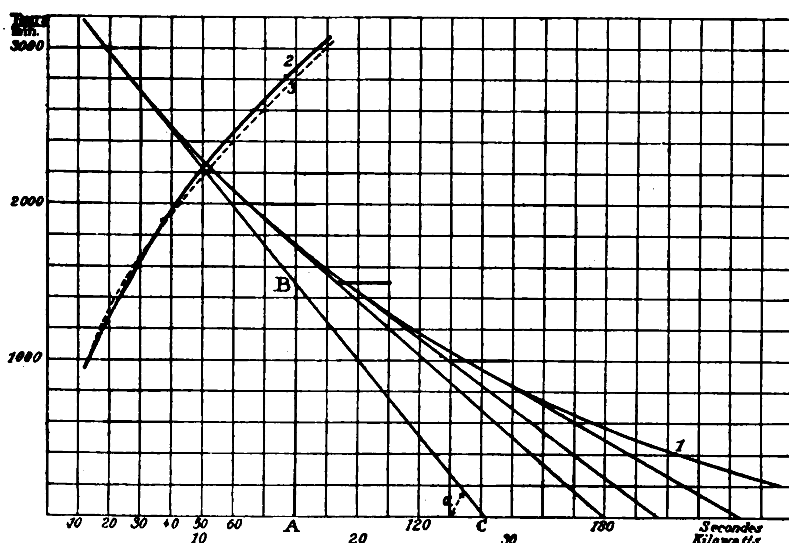


Fig. 10. — Courbe d'arrêt et pertes d'un turbo-alternateur de 250 kw.
1, courbe d'arrêt à vide; 2, pertes à vide, d'après la courbe d'arrêt; 3, pertes à vide (entraînement par moteur).

L'emploi de cette méthode peut être d'un grand secours lorsqu'on n'a pas sous la main de moteur électrique assez puissant pour entraîner la machine, par exemple lorsque celle-ci est excitée, le moteur étant toutefois suffisant pour entraîner la machine non excitée à une vitesse légèrement supérieure à la normale : on excite la machine en même temps que l'on débraye et on peut alors relever la courbe d'arrêt sous excitation. On peut opérer d'une façon analogue pour relever la courbe d'arrêt en court-circuit. Un autre cas où cette méthode peut être utile, c'est lorsque les machines sont sur place, et que l'on a seulement à sa disposition la turbine à vapeur comme moyen d'entraînement, les mesures ne pouvant être suffisamment exactes du côté du moteur.

D'après les résultats qui suivent, on peut avoir toute confiance dans l'emploi de cette méthode, soit que l'on se serve de la valeur de J calculée, soit qu'on la détermine par les essais mêmes, comme on le verra plus loin.

Dans un essai préalable, sur un turbo-alternateur de 250 kilowatts, 3000 tours, nous avons recherché quel degré d'approximation l'on pouvait attendre de la méthode employée directement, c'est-à-dire en se servant de la valeur du moment d'inertie J, calculée *a priori*, d'après les données de construction. La courbe d'arrêt est reproduite sur la figure 10, ainsi que les tangentes à 1000, 1500, 2000 et 3000 tours.

Le moment d'inertie calculé est $J = 4,46$ kg.-m² (kg.-masse). En se reportant au diagramme, on a, par exemple, pour 3000 tours :

$$\left(\frac{dn}{dt}\right)_{\frac{1}{\text{sec}^2}} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{60} \frac{AB^{\frac{\text{tours}}{\text{min.}}}}{AC^{\text{sec}}}$$

et la formule donne

$$M_d^{\text{kg}\frac{m}{\sec^2}\cdot m} = 2\pi \cdot 4{,}46 \cdot \frac{dn}{dt}\ \text{kg.-m} \quad \text{(kg.-force).}$$

En s'aidant de la formule (2), on peut dresser le tableau suivant :

TOURS	$\frac{dn}{dt}$	M_d	KILOWATTS
3 000	0,203	5,67	17,5
2 000	0,145	4,06	8,4
1 500	0,123	3,44	5,32
1 000	0,095	2,66	2,74

auquel correspond la courbe 2 du diagramme.

La courbe 3 représente les pertes mécaniques mesurées par entraînement du rotor au moyen d'un moteur taré à courant continu. On voit que la concordance est très satisfaisante.

Dans les essais de l'alternateur de 2 400 kilovolt-ampères, on a levé les courbes d'arrêt suivantes (fig. 11, *a* à *e*) :

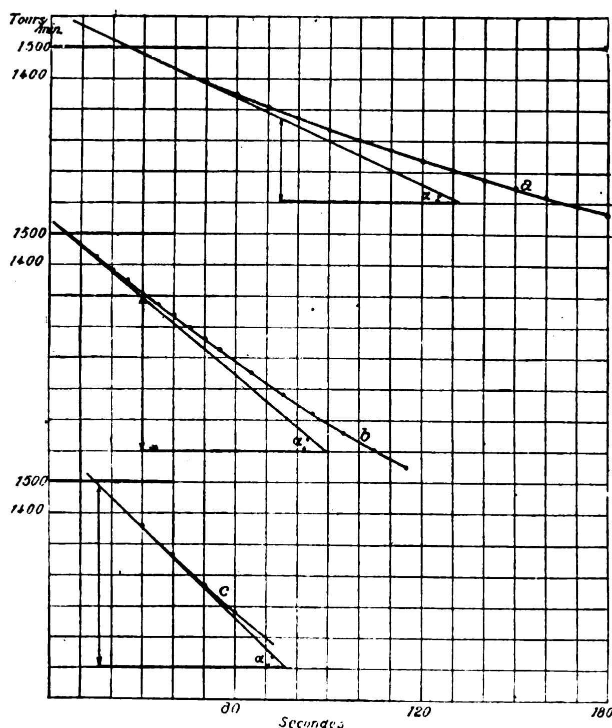


Fig. 11, *a*, *b*, *c*. — Courbes d'arrêt du turbo-alternateur de 2 400 kilovolt-ampères.

a, à vide, sans excitation ; *b*, à vide, excitation : 130 ampères ; *c*, à vide, excitation : 180 ampères.

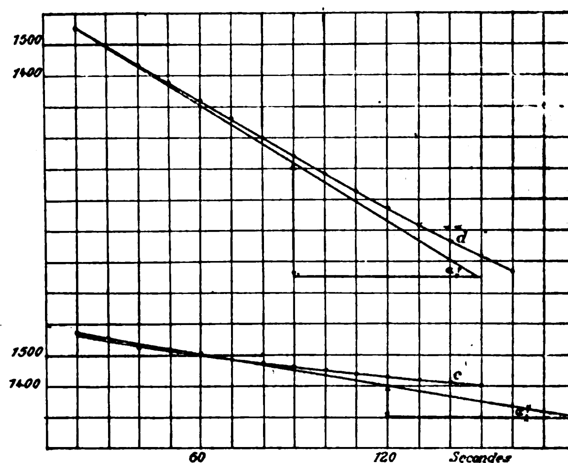


Fig. 11, *d*, *e*. — Courbes d'arrêt du turbo-alternateur de 2 400 kilovolt-ampères.

d, en court-circuit, courant : 300 ampères ; *e*, avec excitatrice comme moteur.

a) Courbe d'arrêt de l'alternateur muni de son excitatrice, à vide, sans excitation. Lectures au tachymètre de 10 en 10 secondes ;

b) Excitation séparée : 130 ampères. Lectures de 5 en 5, puis de 10 en 10 secondes ;

c) Comme *b)*, avec 180 ampères ;

d) L'excitation (séparée) est réglée sur un courant de court-circuit de 300 ampères à 1 500 tours. Le courant de court-circuit étant à peu près indépendant de la fréquence pour

une excitation donnée, il n'y a pas besoin de réglage pendant le tracé de la courbe d'arrêt au voisinage de la vitesse normale ;

e) Le groupe est entraîné par la turbine. L'excitatrice est excitée séparément avec un courant constant (7 amp.), et fonctionne comme moteur sous courant constant (250 amp.). Lorsque le régime est atteint à une vitesse un peu supérieure à 1 500 tours, on débraye la turbine, et on trace la courbe d'arrêt en réglant sur 250 ampères le courant de l'excitatrice-moteur. Ce réglage est facilité par le fait que la diminution de la vitesse est beaucoup moins accentuée que dans les autres cas.

Faisons remarquer ici que l'excitatrice a fourni cette puissance d'environ 35 kilowatts sans la moindre étincelle, quoique sa puissance normale atteint seulement 20 kilowatts comme il ressort du diagramme (fig. 9). A cet état de surcharge, elle suffisait à maintenir les masses tournantes à la vitesse de 1 200 tours environ.

Le moment d'inertie des masses tournantes, calculé de la même manière que dans l'essai préalable, se décompose comme suit :

Arbre et accessoires (ventilateurs, bagues, manchon)......	5,07	kg. mq.
Tôles et cuivre des encoches..................	54,73	—
Têtes des bobines....................	17,23	—
Divers........................	0,23	—
J........................	77,26	kg. mq.

Le seul terme où l'on doive faire quelque hypothèse pour pouvoir le calculer simplement est celui relatif aux têtes des bobines. On voit que l'approximation porte sur moins d'un tiers du total, et que l'erreur qui en résulte ne peut en aucun cas être grande. Ces hypothèses étaient d'ailleurs les mêmes que dans le premier exemple, où les mesures directes confirmaient absolument les résultats obtenus par l'emploi de la méthode.

Dans le cas actuel, nous pouvons d'autre part déterminer expérimentalement la valeur de J comme suit, en nous servant des courbes d'arrêt *a)* et *e)* : dans cette dernière expérience, en effet, l'excitatrice-moteur travaille avec un couple constant M_m, qui tend à conserver la vitesse et agit parallèlement au moment d'inertie.

On a:
$$\left(\frac{dw}{dt}\right)_e = \frac{M_d - M_m}{J}$$

d'où
$$M_d = J\left(\frac{dw}{dt}\right)_e + M_m.$$

Dans l'expérience *a)*, on avait d'autre part:
$$M_d = J\left(\frac{dw}{dt}\right)_a.$$

Par conséquent:
$$J\left(\frac{dw}{dt}\right)_a = J\left(\frac{dw}{dt}\right)_e + M_m.$$

On peut en tirer
$$J = \frac{M_m}{\left(\frac{dw}{dt}\right)_a - \left(\frac{dw}{dt}\right)_e} = \frac{M_m}{2\pi(\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\alpha_e)}. \quad (3)$$

La puissance fournie au moteur est connue par les mesures. En en retranchant les pertes dans l'induit et les pertes dans le fer, on obtient la puissance correspondant au couple, et, à l'aide de la formule (2), le couple lui-même.

Puissance fournie au moteur à 250 amp. 156 volts. . .	39 kw.
Pertes d'induit à 250 amp. ($r_{250\ amp.} = 0{,}025^{\Omega}$ y compris les balais.)	$i^2r = 1{,}6$ kw.
Pertes magnétiques à 1 500 tours, 7 amp. excitation. .	2,2 kw.
Puissance correspondant au couple M_m.	$39 - 1{,}6 - 2{,}2 = 35{,}2$ kw.

$$\text{Couple : } M_m = 35{,}2 \frac{60 \cdot 75}{2\pi \cdot 1\,500 \cdot 0{,}736} = 22{,}8 \text{ kg.-m} \quad \text{(kg.-force)}.$$

Des diagrammes 11 *a)* et 11 *e)* on tire :

$$\operatorname{tg} \alpha_a = \frac{1}{60} \frac{270}{60} = 0{,}075$$

$$\operatorname{tg} \alpha_e = \frac{1}{60} \frac{100}{60} = 0{,}0278.$$

La formule (3) donne enfin :

$$J = \frac{22{,}8}{2\pi(0{,}075 - 0{,}0278)} = 76{,}8$$

au lieu de 77,26 trouvés précédemment.

L'écart entre ces deux valeurs est moindre que 1 %. Un écart de 2 à 3 % serait à la rigueur tolérable, vu qu'il en résulterait, sur le rendement, une erreur de 0,2 à 0,3 % seulement : c'est comme on sait l'avantage de la méthode de détermination des pertes séparées, de réduire dans le résultat définitif les erreurs relatives commises dans la mesure des pertes, dans la proportion de 10 à 1 à peu près.

Adoptons pour J la valeur expérimentale 76,8. On trouve les différentes pertes de la façon suivante :

1° Pertes mécaniques (frottements et ventilations) à 1 500 tours :

$$\operatorname{tg} \alpha_a = 0{,}075$$

$$M_d = 2\pi \cdot 0{,}075 \cdot 76{,}8 = 36{,}2.$$

$$\text{Pertes : } \frac{2\pi \cdot 1\,500}{60} \cdot 36{,}2 \cdot \frac{0{,}736}{75} = 55{,}8 \text{ kw}.$$

2° Pertes magnétiques à 50 périodes, sous 130 ampères d'excitation :

$$\operatorname{tg} \alpha_b = \frac{1}{60} \frac{490}{60} = 0{,}136$$

$$M_d = 65{,}6 \qquad KW = 101.$$

$$\text{Pertes : } 101 - 55{,}8 = 45{,}2 \text{ kw}.$$

3 Pertes magnétiques à 50 périodes, sous 180 ampères d'excitation :

$$\operatorname{tg} \alpha_c = \frac{1}{60} \frac{590}{60} = 0{,}164$$

$$M_d = 79{,}1 \qquad KW = 122.$$

$$\text{Pertes : } 122 - 55{,}8 = 66{,}2 \text{ kw}.$$

D'après les forces électromotrices réduites aux excitations 130 et 180 ampères, soit, sur la figure 6, respectivement 5 700 et 6 950 volts, on peut trouver l'exposant de variation des pertes dans le fer avec l'induction :

$$\frac{66{,}2}{45{,}2} = \left(\frac{6\,950}{5\,700}\right)^x.$$

On trouve $x = 1{,}9$.

La théorie indique $x = 1,6$ pour les pertes d'hystérésis et $x = 2$ pour les pertes par courants de Foucault.

Pour les pertes résultantes dans les machines, nous trouvons ordinairement, dans les mêmes régions de saturation magnétique : $x = 1,8$ à $1,95$.

4° Pertes de court-circuit à 300 ampères (courant normal = 235 ampères ; courant à 2400 kilovolt-ampères : 243 ampères) :

$$\text{tg } \alpha_d = \frac{1}{60}\,\frac{370}{60} = 0,103$$

$$M_d = 49,7 \qquad KW = 76,5.$$

$$\text{Pertes à 300 amp.} : 76,5 - 55,8 = 20,7$$

$$\text{— à 243 — (2400 KVA)} : 20,3 \left(\frac{243}{300}\right)^2 = 13,6 \text{ kw.}$$

La résistance de l'enroulement induit, mesurée à froid, est de 0,05 Ω par phase.

On a donc, pour les pertes d'induit calculées, à chaud, sous 243 ampères :

$$1,16 \,.\, 3 \,.\, 0,05 \,.\, 243^2 = 10,3 \text{ kw.}$$

Le rapport des pertes de court-circuit aux pertes purement ohmiques est donc :

$$\frac{13,6}{10,3} = 1,32.$$

Ce rapport, dans les alternateurs ordinaires de bonne construction, varie, d'après notre expérience, entre 1,2 et 1,3.

La méthode de la courbe d'arrêt nous a donc permis de déterminer aisément et rapidement (les mesures à la plate-forme d'essais étant extrêmement simples) les différentes pertes, sauf les pertes d'excitation. Celles-ci se calculent aisément, après mesure de la résistance de l'enroulement inducteur. La résistance ohmique de cet enroulement est, à chaud, de 0,5Ω (voir fig. 12).

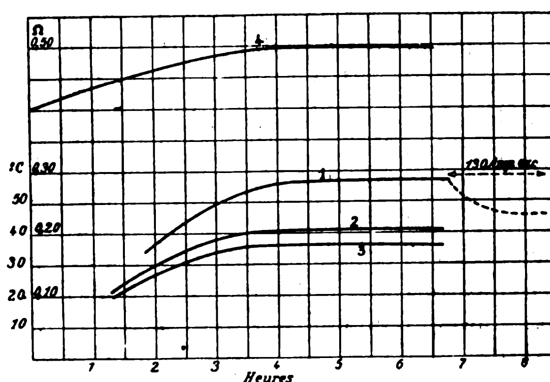


Fig. 12. — Courbes d'échauffement du turbo-alternateur de 2400 kilovolt-ampères.

1 et 2, élévation de température des tôles, 180 amp. exc.; 3, élévation de temp. de l'air des canaux, 180 amp. exc.; 4, résistance ohmique de l'induction, 180 amp. exc.

On a, pour les pertes d'excitation i^2r, i étant connu d'après les caractéristiques (fig. 6) :

PERTES D'EXCITATION EN KILOWATTS

	$\cos \varphi = 1$	$\cos \varphi = 0,8$	$\cos \varphi = 0,7$
Pleine charge	10,9	16,2	17,1
3/4 —	10,4	13,9	14,6
Demi —	9,8	11,9	12,4
1/4 —	9,1	10,1	10,5

Les rendements industriels, calculés d'après la formule :

$$y = \frac{KW \cdot = KVA \cdot \cos \varphi}{KW + \text{pertes méc.} + \text{pertes magn.} + I^2R + i^2r}$$

sont les suivants :

RENDEMENT DU TURBO-ALTERNATEUR DE 2400 KILOVOLT-AMPÈRES

%	$\cos \varphi = 1$	$\cos \varphi = 0,8$	$\cos \varphi = 0,7$
Pleine charge	95	93,3	92,7
3/4 —	93,8	92,2	91,2
Demi —	91,4	89,2	87,8
1/4 —	84,5	81,1	79

Les mesures d'échauffement ont été faites comme suit : l'essai de durée ne pouvant être installé en charge, on a fait cet essai à vide, mais sous une excitation de 180 ampères. Les pertes d'induit sous cette excitation (66 kw.), étant plus grandes que la somme des pertes dans le fer à 130 ampères d'excitation et des pertes dans le cuivre induit ($45 + 13,6 = 58,6$ kilowatts), le courant d'excitation étant d'ailleurs celui de la pleine charge inductive, les conditions de l'essai étaient plutôt défavorables, vu que les quantités globales de chaleur à dissiper étaient plus grandes. Un échauffement local du cuivre induit n'est du reste pas à redouter, les saturations étant les mêmes que dans d'autres turbo-alternateurs essayés en charge avec succès. On a, de plus, fait un essai spécial de durée en court-circuit ; après 2 heures et demie de marche, avec 300 ampères de courant dans l'induit, l'échauffement permanent du cuivre était seulement de 30° C.

Quant aux tôles, les inductions étaient plus élevées qu'elles ne l'eussent été dans un essai de pleine charge, puisque tous les ampère-tours de l'inducteur agissaient pour élever le flux, tandis qu'en charge, une partie en est neutralisée par les ampère-tours de réaction d'induit.

L'essai ainsi conduit présente donc toutes les garanties. La durée en a été de 7 heures, et les mesures sont représentées graphiquement sur la figure 12.

L'échauffement final des tôles, au point le plus chaud, a été d'environ 55° C., l'échauffement des paquets situés au voisinage du canal de ventilation central : 40° C., et l'échauffement de l'air à l'intérieur des canaux : 36° C.

La différence d'échauffement des tôles aux points les plus éloignés du canal de ventilation et au voisinage de celui-ci paraît assez grande, mais il faut remarquer que, par les conditions de l'essai même, toutes les pertes d'induit sont des pertes magnétiques, tandis qu'en marche normale, la répartition est beaucoup plus favorable pour éviter un échauffement local des tôles. On a :

Causes d'échauffement dans l'essai :

Tôles de l'induit.	66 kw.
Cuivre —	0
Cuivre inducteur.	17
Total.	83 kw.

Causes d'échauffement normales :

Tôles de l'induit.	45 kw.
Cuivre —	13,6
Cuivre inducteur.	17
Total.	75,6 kw.

La température de l'air dans les canaux, et des tôles au voisinage de ceux-ci, particulière-

ment pour le canal central, dépend avant tout des pertes totales ; on peut donc s'attendre, en marche à pleine charge, à un échauffement de ces régions peu différent de l'échauffement constaté dans l'essai (35 à 40° C.). Au contraire, pour les tôles au centre des paquets, la valeur de 55° atteinte est trop grande : en marche normale, en effet, les causes de refroidissement, qui sont ici presque exclusivement le rayonnement, ne seront pas changées, tandis que les causes d'échauffement, c'est-à-dire les pertes dans les tôles, seront notablement diminuées. Pour avoir une idée du chiffre auquel on peut s'attendre à pleine charge, on a ramené, à la fin de l'essai, l'excitation à la valeur normale de 130 ampères, et l'échauffement maximum est tombé à 46° C. après une heure. On peut donc s'attendre, en résumé, à une température de 45 à 50° C. au maximum, et 40° C. au voisinage des canaux de ventilation.

Le chiffre garanti normalement est de 50° C.

L'échauffement du cuivre rotorique a été calculé d'après les mesures de résistance faites pendant le cours de l'essai (fig. 12, courbe 4).

On a la relation :

$$r_t = r_n [1 + \alpha (t - n)]$$

entre la résistance d'un enroulement à la température t et sa résistance à la température n, α étant un coefficient spécifique qui, pour le cuivre, est égal à 0,004. La température du local au début de l'essai était 13° C.; la résistance en ce moment $r_{13} = 0{,}405\Omega$.

A la fin de l'essai on avait $r_t = 0{,}495\Omega$ (¹).

Donc :

$$0{,}495 = 0{,}405 [1 + 0{,}004 (t - 13)]$$

et

$$t = 68^\circ\,\mathrm{C},$$

la température ambiante étant alors 22,5°.

On a pour l'excès de température cherché : $\tau =$ env. 45° C.

A la fin de l'essai, on s'est rendu compte qu'il n'y avait pas d'échauffements locaux à l'intérieur de la machine, notamment au voisinage de l'entrefer et des dents, au moyen de sondes à la cire et à la paraffine introduites par les canaux de ventilation. Au contact du métal, la paraffine fond encore, la cire reste solide. Les points de fusion de ces deux corps étant respectivement 54° et 64°, et la température de l'air ambiant étant de 22,5°, on en conclut que l'excès de température intérieur est environ de 40° C.

L'enroulement induit a été essayé au point de vue de son isolement, sous 14 200 volts de différence de potentiel entre le cuivre et la masse, et s'est bien comporté.

Léon LEGROS.

(¹) De la 4ᵉ à la 5ᵉ heure, le diagramme indique 0,5Ω, mais le courant d'excitation était alors poussé à 195 ampères.

LES TURBINES A GAZ

Tout récemment la Société des Ingénieurs Civils a consacré plusieurs de ses réunions à une assez longue discussion sur les turbines à gaz, ce qui n'a pas manqué d'attirer fortement l'attention des ingénieurs sur un genre de machines dont beaucoup ignoraient encore l'existence. Est-ce à dire que ces communications ont eu pour objet de décrire des installations fonctionnant avec turbines à gaz comme beaucoup déjà fonctionnent avec turbines à vapeur ? Certes non. A côté d'une étude générale, malheureusement trop théorique et qui témoignait

du manque de données d'expérience, mais qui a eu cependant le mérite d'ouvrir la discussion, sont venus s'adjoindre, sous forme de réponses et même de ripostes, soit des observations techniques, soit des exposés de résultats déjà obtenus, ainsi que l'annonce de résultats prochains.

Ce n'est pas d'ailleurs la première fois qu'une étude théorique est présentée sur ce genre intéressant de machines. Les premières ont été publiées en 1904 dans la « Schweizerische Bauzeitung » et ici même. Nous renvoyons le lecteur à ce sujet aux deux numéros des 12 et 19 novembre 1904 de l'*Éclairage Électrique*. — Mais puisque notre but est d'exposer dans sa plus grande généralité l'état actuel de la question, nous ne saurions mieux faire que d'examiner successivement les idées apportées par les différents conférenciers à la Société des Ingénieurs Civils, quitte à les résumer ensuite et à en tirer une conclusion d'ensemble en y ajoutant des renseignements plus récents et encore inédits.

La longue communication de M. Sékutowicz, point de départ de la discussion, comprend quatre parties :

Définition et historique des turbines à gaz ;
Étude thermodynamique des turbines à gaz ;
Étude de la turbine proprement dite ;
Détails de construction.

L'auteur nous rappelle que la première idée d'une telle machine, qu'il définit comme étant « une machine thermique dans laquelle la chaleur est transformée en travail mécanique par la détente d'un mélange de gaz agissant sur l'organe mobile d'une turbine », remonte au moins à 1847 (Recherches de l'Ingénieur en chef des mines Burdin, présentées à l'Académie des Sciences en 1853, par Tournaire). Mais il nous semble que la question des origines ne doit pas nous préoccuper outre mesure, sauf la satisfaction de savoir que la voie a été tracée par des savants français, malgré quelques vagues protestations formulées par des ingénieurs allemands. Dans tous les cas, il est naturel que les récents succès de la turbine à vapeur aient conduit à rechercher un moteur analogue vis-à-vis des machines à gaz. Nous décrirons du reste, le moment venu, les dispositifs qui semblent avoir une valeur industrielle et laissant, dès maintenant, l'historique de la question, nous résumerons rapidement l'étude thermodynamique des turbines à gaz.

Les différents cycles d'évolution susceptibles d'être appliqués aux turbines à gaz sont les cycles à introduction de chaleur isothermique, ceux à introduction de chaleur isobarique (combustion sous pression constante) et enfin les cycles à introduction de chaleur isoplérique (nous dirons cycles des moteurs à explosion pour parler plus simplement).

Le premier mode d'évolution n'est autre que le cycle de Carnot et on ne saurait réaliser une combustion isothermique dans une turbine à gaz, car il faudrait des compressions considérables et des masses de gaz énormes. Dès lors, le compresseur deviendrait justement l'organe le plus important de la turbine, alors que c'est de lui que viennent toutes les difficultés de réalisation pratique dans ce genre de machines. Le cycle Diesel, qui ne diffère du cycle de Carnot que par la présence d'une seule compression adiabatique au lieu de deux compressions successives, l'une isothermique et l'autre adiabatique, ne peut convenir davantage aux turbines à gaz. Du reste M. Deschamps n'a pas manqué, très justement croyons-nous, de protester contre l'application du théorème de Carnot à des cycles qui ne sont ni réversibles, ni soumis à des températures relativement basses.

En ce qui concerne les cycles analogues à ceux des moteurs à combustion, l'auteur a recherché, à l'aide de calculs, s'il convenait d'adopter une compression isothermique ou une compression adiabatique. Ces calculs, qui sont multiples, prêtent à la critique, car ils

sont établis en adoptant des chaleurs spécifiques constantes. Nous reviendrons du reste plus loin sur ce point. Quoi qu'il en soit, l'auteur a conclu à l'adoption d'une compression isothermique poussée aussi loin que possible vers 30 ou 40 atmosphères. A ce propos, d'après les hypothèses faites, le rendement total pourrait être de 30 °/₀ et on serait ainsi conduit à dépenser 2 120 calories par cheval-heure effectif disponible sur l'arbre, ce qui correspond à une consommation de 212 grammes de naphte à 10 000 calories. Or les moteurs Diesel et Banki en consomment 180 à 250 grammes, et les moteurs à gaz de hauts fourneaux dépensent 2 000 calories au minimum par cheval effectif. Ces consommations probables des turbines à gaz seraient donc comparables à celles des meilleurs moteurs connus. Malheureusement, le même point noir existe toujours : la compression absorbe beaucoup trop de la puissance effective.

Quant aux cycles des moteurs à explosion, les conclusions qui les concernent sont les suivantes : les turbines à explosion avec compression adiabatique ont un faible rendement ; l'augmentation de la compression initiale n'exerce que peu d'influence, de sorte que ces machines ne peuvent présenter quelque intérêt que pour les très faibles puissances et dans le cas où la dépense de combustible est secondaire ; il convient alors de n'employer qu'une compression préalable nulle ou insignifiante. Les turbines à explosion avec compression isothermique auraient un excellent rendement si la température d'échappement pouvait être supérieure à 700° ; mais, dans ces conditions, la construction est irréalisable car les organes d'obturation de la chambre d'explosion ne pourraient résister aux très hautes températures mises en jeu. En résumé, le meilleur rendement jusqu'ici semble devoir être obtenu par des turbines à combustion avec de fortes compressions, de fortes introductions de chaleur (500 cal. par kilog. environ) et avec une température d'échappement voisine de 700° absolus.

N'est-il pas possible de réaliser des rendements meilleurs ? Plusieurs moyens nous sont indiqués. Le premier serait de disposer la machine de manière qu'une partie de l'évolution des gaz pût se faire à une pression inférieure à celle de l'atmosphère. Il en était ainsi dans les moteurs atmosphériques « utilisant un piston projectile ». Ici, ce résultat serait obtenu en principe au moyen d'une pompe à air. Toutefois, en raison des dimensions exagérées des cylindres, les machines à piston ne sauraient convenir. Il faudrait recourir aux ventilateurs multicellulaires ou aux turbo-compresseurs. Mais pour diminuer le travail absorbé, il faut opérer à température constante et les gaz d'échappement doivent pénétrer dans le ventilateur à une température voisine de 300° absolus. On pourrait obtenir ce résultat, soit par une injection d'eau très abondante avec une sorte de condenseur barométrique comme réfrigérant, soit par l'emploi d'un réfrigérant tubulaire à circulation d'eau. On pourrait aussi refroidir les gaz dans un vaporisateur à gaz sulfureux, faisant partie d'une machine à vapeur froide. Quoi qu'il en soit, le meilleur mode d'utilisation du système serait le suivant : disposer un turbo-compresseur livrant le gaz sous 6 kilogrammes de pression par exemple à la chambre de combustion et faire suivre la turbine motrice d'un turbo-compresseur, de manière à avoir à l'échappement une pression de 1/6 d'atmosphère, cette solution étant certainement supérieure à celle qui n'utiliserait qu'un seul compresseur à 36 atmosphères.

Un autre moyen d'arriver à de meilleurs rendements serait d'appliquer la récupération de chaleur aux cycles étudiés, mais cette récupération ne s'appliquerait bien qu'aux cycles à compression isothermique et surtout à ceux dans lesquels la combustion a lieu sous pression constante. Dans ce système, une partie de la chaleur des gaz de l'échappement serait employée à réchauffer les gaz comprimés se rendant dans la chambre de combustion. Le rendement thermique, d'après des calculs laborieux, serait ainsi sensiblement amélioré sans que le rendement mécanique ni l'importance du compresseur fussent beaucoup modifiés.

Sur cette idée de la récupération directe vient naturellement s'en greffer une autre, celle d'utiliser une partie des chaleurs perdues dans une seconde turbine, à gaz sulfureux ou même à vapeur. Mais les calculs donnent réellement une valeur trop faible au travail ainsi disponible pour qu'il soit intéressant de le récupérer.

Enfin, comme dernier procédé, examinons celui qui consisterait à injecter de l'eau, de la vapeur et des gaz froids. Il serait, en effet, très avantageux de pouvoir diminuer la quantité de gaz que l'on est obligé de comprimer pour réaliser un certain travail. Or, à moins de recourir à des compressions excessives dépassant un rapport de 80 pour fixer les idées, on ne peut pas introduire plus de 450 calories par kilogramme de gaz, tandis que certains mélanges combustibles fourniraient aisément de 550 à 600 calories. On est donc obligé de diluer ces derniers et d'augmenter ainsi de 20 à 30 °/₀ la masse de gaz à comprimer. Cet inconvénient s'aggrave encore si l'on comprime moins. Aussi est-il naturel de rechercher si l'on ne pourrait pas employer les mélanges combustibles riches sans aucune dilution, mais en limitant soit la température de combustion, soit la température finale de détente au moyen de ces injections.

En ce qui concerne la température de combustion, le refroidissement externe de la chambre de combustion semble n'offrir que des inconvénients, car les calories ainsi soustraites ne participent plus à l'évolution. Mais on peut utiliser ces calories à vaporiser de l'eau et envoyer la vapeur produite soit dans une turbine spéciale, soit dans la turbine à gaz principale au moyen de tuyères distinctes, soit dans la tuyère de détente des gaz, soit enfin dans la chambre de combustion elle-même. La première solution conduit à un dispositif sans intérêt au point de vue du rendement pour des compressions normales ; son seul avantage est de réduire l'importance du compresseur. Il en serait d'ailleurs de même avec les dispositifs basés sur les deux autres solutions. Il reste à examiner la dernière : injection de la vapeur produite dans la chambre de combustion, le résultat étant d'ailleurs le même que si l'on injectait dans cette chambre de l'eau à poids égal. Le calcul conduit à cette conclusion que l'injection d'eau est plus avantageuse que l'introduction d'un excès d'air de combustion, surtout en raison de la possibilité de réduire les dimensions du compresseur. Mais cette eau injectée ne risque-t-elle pas de se dissocier dans les conditions de température et de pression qui caractérisent le régime de la combustion ? Il est probable que non, car la dissociation ne commence qu'à 1 300° absolus sous la pression atmosphérique et la tension de dissociation n'atteint la valeur de 0,5 qu'à 2 100° absolus.

Le refroidissement extérieur de la chambre de combustion n'est pas d'ailleurs le seul procédé pour agir sur la température de combustion. On peut se proposer encore de remplacer l'introduction d'un excès d'air dans cette chambre par une injection de vapeur obtenue, non pas en brûlant du combustible dans une chaudière, — car nous retomberions dans le cas d'une injection d'eau avec les pertes de chaleur supplémentaires dans une chaudière séparée apportant elle-même des complications, — mais en produisant cette vapeur dans un récupérateur au moyen des chaleurs perdues de la turbine à gaz. Avec certaines hypothèses, l'effet utile total ainsi obtenu serait très peu différent de celui que l'on obtiendrait avec un récupérateur réchauffant l'air comprimé, mais la consommation d'air par cheval effectif serait moindre et le procédé présenterait un avantage pratique sérieux.

Enfin, un autre mode de limitation des températures de combustion serait l'emploi de fortes injections d'eau combiné avec celui d'un comburant très riche. S'il était possible d'employer, en effet, de l'oxygène pur comme comburant, le poids total des gaz brûlés serait beaucoup moindre et, par suite, le nombre de calories introduites par kilogramme de gaz augmenterait dans de semblables proportions. L'injection d'eau dans la chambre de combustion

pourrait être très grande et la turbine mixte ainsi obtenue n'exigerait plus qu'un très petit compresseur qu'on pourrait même remplacer par une simple pompe centrifuge à haute pression si l'on utilisait de l'oxygène liquide. Au fond, la machine comprendrait seulement trois pompes semblables, l'une pour l'oxygène, l'autre pour le pétrole et la troisième pour l'eau — un faisceau tubulaire chauffé par les gaz de l'échappement réchauffant méthodiquement l'eau et évaporant l'oxygène liquide — et enfin la chambre de combustion et la turbine. C'est là plutôt une curiosité scientifique qu'il n'est pas cependant absurde d'envisager car M. Cailletet a proposé un dispositif analogue dans le cas de moteurs légers (à piston) destinés à la navigation aérienne ou sous-marine.

Puisque l'on peut agir sur la température de combustion, on peut se proposer aussi de limiter la température de détente.

Si l'on refroidit extérieurement la tuyère de détente, la détente n'est plus adiabatique et du reste les calories soustraites sont définitivement perdues. Si l'on refroidit les gaz détendus par une injection d'eau, les pertes sont moindres mais cependant trop importantes encore. On pourrait aussi produire de la vapeur par récupération et l'injecter après détente mais on se heurterait à de grandes difficultés. — Reste l'injection de gaz froids soit à faible vitesse, soit à la vitesse du courant principal, mais les conclusions ne sont nullement favorables à ces idées.

Ainsi donc, de toute cette étude thermodynamique, il ne ressort aucune combinaison susceptible de dépasser les résultats fournis par les moteurs à gaz les plus perfectionnés. On reconnaît certes la probabilité de grands rendements thermiques dans ces machines, mais ils seraient compensés par la faiblesse du rendement mécanique. Heureusement, celui-ci peut être amélioré, de sorte qu'il reste une marge de progrès encourageante pour l'avenir.

Quoi qu'il en soit, il nous a semblé intéressant d'indiquer les grandes lignes de l'étude thermodynamique à laquelle s'est livré M. Sékutowicz, sous réserve de lui opposer, le moment venu, les critiques qu'elle a soulevées, car elle contient des aperçus intéressants. De même il ne nous semble pas inutile, avant de poursuivre, d'en rappeler les conclusions principales.

« Le meilleur mode d'évolution pour les turbines à gaz correspond au cycle des moteurs dits à combustion, c'est-à-dire comportant une combustion sous pression constante avec compression isothermique préalable. Les pressions extrêmes importent peu en valeur absolue; c'est leur rapport qui est intéressant, et, en échappant sous pression réduite, on peut faciliter l'emploi des ventilateurs polycellulaires. La température d'échappement doit être aussi élevée que possible en raison de la conservation des roues mobiles. Enfin la meilleure façon d'utiliser les chaleurs perdues à l'échappement consiste dans la récupération simple de gaz à gaz par un réchauffeur tubulaire. La récupération au moyen d'une chaudière ne devient intéressante que pour les combustibles très riches, et le mieux est alors d'envoyer la vapeur dans la chambre de combustion.

Quant aux turbines à explosion, elles ne seraient applicables qu'aux très petites puissances, pour des machines légères où le rendement est secondaire et sans compression préalable. »

La troisième partie du travail de M. Sékutowitz, qui traite de la turbine à gaz au point de vue mécanique, n'est qu'une adaptation immédiate des travaux analogues pour la turbine à vapeur, en particulier de ceux du Pr Stodola. — Les particularités intéressantes, dans le cas actuel, sont les vitesses d'écoulement ainsi que la puissance débitée par unité de section des tuyères, plus grandes pour les gaz que pour la vapeur. — Il faudrait ajouter que, d'après les essais de Stodola et des autres expérimentateurs, il se

•••

produirait, en régime variable, de graves inconvénients avec les turbines à explosion ; mais M. Deschamps a fait observer, dans le courant de la discussion, que plusieurs procédés avaient été imaginés avec lesquels il est possible de supprimer ces inconvénients. D'autre part, les turbines à réaction ne seraient pas recommandables pour les turbines à gaz, d'abord parce qu'elles exigent, à vitesse tangentielle égale, un plus grand nombre de roues mobiles et surtout parce que les turbines à action se prêtent à l'emploi d'une seule détente et permettent de n'envoyer les gaz, sur la roue mobile, qu'après leur refroidissement par cette détente. — Bien qu'il soit impossible de prédéterminer le rendement des disques mobiles d'une turbine à gaz, car l'expérience seule peut donner des indications sur le frottement des gaz chauds se détendant sur des aubages, on peut supposer qu'il sera moindre que dans les turbines à vapeur et dès lors il serait bon d'augmenter le nombre des disques mobiles. Seule encore, l'expérience pourra donner des indications précises sur le rendement mécanique que l'auteur suppose toutefois devoir au moins égaler celui des turbines à vapeur. — Quant au réglage de la vitesse des turbines à gaz à combustion, il ne paraît pas devoir présenter de sérieuses difficultés.

Il ne reste plus maintenant qu'à étudier certains détails de construction des turbines à gaz, ce qui fait l'objet de la quatrième et dernière partie de la communication. — Partant de cette idée que pour réaliser un bon rendement, il faut choisir un rapport de pressions aussi élevé que possible (voisin de 40), trois dispositifs peuvent être adoptés : un compresseur à piston comprimant directement à 40 atmosphères; un turbo-compresseur comprimant à 4 kilogrammes suivi d'un compresseur à piston comprimant de 4 à 40 atmosphères; un turbo-compresseur comprimant à 10 kilogrammes par exemple et, en aval de la turbine, un condenseur à 1/4 d'atmosphère.

Les compresseurs à piston liquide Sommellier, Dubois et François, etc. sont beaucoup trop encombrants: les compresseurs à simple injection d'eau genre Colladon, ou à refroidissement dans des réservoirs intermédiaires, genre Mékarski, peuvent convenir et on peut estimer leur rendement compris entre 0,70 et 0,80 pour les machines de 100 à 1 000 chevaux et entre 0,80 et 0,90 pour les unités de 2 000 chevaux. — Depuis quatre ou cinq ans, on a étudié aussi des compresseurs à marche rapide (500 à 600 tours pour les types de 100 chevaux, par exemple) qui, mieux encore que les précédents, donneraient une solution acceptable au point de vue de l'encombrement.

Quant aux compresseurs rotatifs, on commence à les employer pour les moyennes et les petites forces et leur emploi serait tout indiqué dans les turbines à gaz de faible puissance. Mais la vraie solution est très probablement dans l'application aux turbines à gaz de turbo-compresseurs du système Rateau. — Nous n'avons pas trouvé à ce sujet d'idée bien nette dans la communication de l'auteur, qui semblait du reste n'avoir pas connaissance des essais effectués à l'heure actuelle et sur lesquels nous aurons l'occasion de revenir. Quoi qu'il en soit, voici le principe d'un de ces turbo-compresseurs qu'il ne nous semble pas inutile d'indiquer. Si on accouple directement un ventilateur à une turbine faisant de 10 000 à 20 000 tours par minute, on obtient, avec un rendement de 0,60, une compression dans le rapport de 1 à 1,5. En accouplant en série plusieurs roues mobiles la pression absolue croît en progression géométrique. Par suite, 4 ventilateurs en série analogues au précédent donnent une pression finale de $(1,5)^4 = 5$ kilogrammes environ de pression.

La question des compresseurs n'est pas la seule qui mérite toute l'attention dans les recherches concernant les turbines à gaz. Elle est cependant la plus importante de toutes les questions accessoires. Il faudra se préoccuper en outre des récupérateurs de chaleur, du combustible à employer liquide ou gazeux, de la chambre de combustion, des tuyères, des

aubes mobiles dont la construction doit être analogue à celle des turbines à vapeur, sauf à tenir compte des températures élevées auxquelles elles seront soumises.

Nous ne nous étendrons pas davantage sur l'analyse de l'étude présentée par M. Sékutowicz à la Société des Ingénieurs Civils. En somme, nous l'avons déjà dit, cette étude est nettement et même uniquement basée sur des hypothèses, l'auteur n'ayant fait nulle part appel à l'expérience ni aux essais déjà effectués. C'est cependant le point qui nous semble importer le plus et auquel nous arriverons, non toutefois sans avoir reproduit, du moins en partie, les critiques que cette communication a soulevées.

(A suivre.) A. Becq.

REVUE INDUSTRIELLE ET SCIENTIFIQUE

THÉORIES ET GÉNÉRALITÉS

Contribution à la théorie de l'arc chantant. — **H. T. Simon.** — *Physikalische Zeitschrift*, 1er juillet 1906.

1° On sait qu'un arc à courant continu entre charbons homogènes peut engendrer des oscillations non amorties dans un système oscillant contenant de la self-induction et de la capacité et placé en dérivation sur ses bornes. Le rôle physique de l'arc est de permettre à son circuit de compenser automatiquement les pertes d'énergie produites dans le circuit oscillant par la résistance ohmique et par d'autres causes. Soient L_2 et C_2 la self-induction et la capacité du circuit oscillant et E_2 la différence de potentiel entre les extrémités de ce circuit. On a l'équation différentielle

$$E_2 = i_2 w_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_2}\int i_2 dt.$$

dont l'intégrale est :

$$i_2 = \frac{2C_2E_2}{\sqrt{4L_2C_2 - w_2^2C_2^2}} \varepsilon^{-\frac{w_2}{2L_2}t} \sin \frac{\sqrt{4L_2C_2 - w_2^2C_2^2}}{2L_2C_2} t.$$

Pour transformer en une oscillation non amortie l'oscillation amortie que représente cette équation, il faut multiplier par $\left(\varepsilon^{\frac{c}{2L_2}t}\right)$, ce qui correspond à une équation différentielle

$$e_2 = E_2 + ci_2 = i_2 w_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_2}\int i_2 dt.$$

On peut donc dire que l'arc chantant se comporte comme une partie constitutive du circuit 2 comme s'il avait une « résistance négative », ou comme s'il développait une f. é. m. $e' = ci_2$, proportionnelle au courant i_2 circulant dans le circuit parallèle 2 dont l'énergie ci_2^2 compense les pertes Joule $i_2^2 w$. Pour le cas de très petites oscillations, Duddell a montré que l'arc doit satisfaire aux conditions

$$\frac{de_1}{di_1} < 1 \quad \text{et} \quad \left[\frac{de_1}{di_1}\right] \geqslant w.$$

Si l'on appelle résistance de l'arc le rapport de_1/di_1, on voit que la résistance de l'arc doit être négative et doit être au moins égale, en valeur absolue, à la résistance ohmique du circuit oscillant. Pour cela, on suppose que i_0 est constant pour l'oscillation et égal à J_0, condition qu'obtenait Duddell en employant une forte résistance en série R_0 et une différence de potentiel agissante suffisamment grande : ce résultat est aussi bien et même mieux atteint par l'emploi d'une forte self-induction en série L_0.

Il est important, pour les considérations qui suivent, de savoir jusqu'à quel point pratiquement cette condition $i_0 = J_0 =$ constante est remplie. L'auteur a étudié avec un oscillographe l'allure de i_0 et de i_1 pour une résistance en série de 60 ohms et sans self-induction. Les oscillographies montrent que les variations de i_0 sont très faibles. L'emploi d'une self-induction L_0 permet de les rendre aussi petites que l'on veut.

2° D'une façon générale, les conditions que doit remplir l'arc pour produire des oscillations permanentes dans le circuit 2 peuvent être formulées de la façon suivante :

L'oscillation peut toujours être exprimée sous la forme :

$$i_2 = \sum_{\nu=1}^{\nu=\infty} J_\nu \sin(2\pi\nu t + \varphi_\nu).$$

En supposant $i_1 = J_0 - i_2$, on a :

$$i_1 = J_0 - \sum_1^\infty J_\nu \sin(2\pi\nu t + \varphi_\nu) = J_0 + i'_1.$$

La f. é. m. $e_2 = E_2 + ci_2 = E_2 + e'_2$ entretiendra une oscillation si e'_2 est de la forme

$$\sum_1^\infty E_\nu \sin(2\pi\nu t + \psi_\nu).$$

Si l'on écrit l'équation d'énergie

$$E_2 i_2 dt + e'_2 i_2 dt$$
$$= i_2^2 w_2 dt + L_2 i_2 \frac{di_2}{dt} dt + i_2 dt \frac{1}{C_2} \int i_2 dt,$$

et si l'on intègre pendant une période entière T, on obtient, dans le premier membre, le travail fourni pendant une période pour l'entretien de l'oscillation, et, dans le second membre, le travail absorbé dans le circuit dérivé. On a :

$$\int_0^T E_2 i_2 dt = 0,$$

$$\int_0^T L_2 i_2 \frac{di_2}{dt} dt = 0$$

et

$$\int_0^T i_2 dt \frac{1}{C_2} \int_0^T i_2 dt = 0,$$

car le champ magnétique et électrique dans une demi-période cède au circuit autant d'énergie que le circuit en dépense dans la demi-période précédente pour la formation du champ.

On a donc, quand l'arc produit des oscillations permanentes, les relations :

$$\int_0^T e'_2 i_2 dt = \int_0^T i_2^2 w_2 dt. \qquad (1)$$

Le second membre, étant toujours positif, il en résulte que, dans l'arc chantant, on doit avoir toujours

$$\int_0^T e'_2 i_2 dt > 0 \qquad (1_a)$$

et

$$\left[\int_0^T e'_2 i_2 dt\right] = \left[\int_0^T i_2^2 w dt\right]. \qquad (1_b)$$

Le travail dépensé dans l'arc pendant une période pour la différence de potentiel e_2 est :

$$\int_0^T e_2 i_1 dt = \int_0^T (E_0 + e'_2)(J_0 + i'_1)\, dt$$
$$= \int_0^T e'_2 i'_1 dt = -\int_0^T e'_2 i_2 dt$$

puisque $i'_1 = -i_2$. Il est donc égal et de signe opposé au travail dépensé dans le circuit oscillant. L'énergie cédée au circuit oscillant est donc produite en apparence dans l'arc. Comme conditions du phénomène oscillant, on peut écrire aussi

$$\int_0^T e'_2 i'_1 dt < 0 \qquad (2_a)$$

$$\left[\int_0^T e'_2 i'_1 dt\right] = \left[\int_0^T i_2^2 w dt\right]. \qquad (2_b)$$

Quand e'_2 et i'_1 ne diffèrent pas trop comme forme d'une sinusoïde, on obtient dans la relation (2_a) comme valeur de l'intégrale :

$$E'_{2\,eff} \cdot J'_{1\,eff} \cdot f,$$

f étant le facteur de puissance. Dans le cas où e_2 et i'_1 sont purement harmoniques, on a $f = \cos\varphi$, φ étant le décalage entre e'_2 et i'_1. Quand les oscillations subsistent, il faut d'après les conditions qui précèdent, que φ soit compris entre 90 et 270°. Il doit être d'autant plus proche de 180° que la valeur de w_2 est plus grande.

3° Les considérations qui précèdent sont de nature purement électrodynamique et sont valables, d'une façon toute générale, pour tous les conducteurs et non pour l'arc seul. Elles indiquent qu'un conducteur pouvant entretenir des oscillations dans un circuit dérivé présente une chute de tension qui décroît quand le courant augmente et qui croît quand le courant diminue. Si l'on représente les propriétés d'un conducteur par sa caractéristique, c'est-à-dire par la relation graphique entre le courant et la différence de potentiel, on arrive à la règle énoncée précédemment par l'auteur et par Reich (1) :

Tout conducteur à caractéristique tombante est susceptible d'entretenir des oscillations permanentes dans un système oscillant dérivé.

La théorie de l'arc chantant est donc intimement liée avec l'étude de la caractéristique de l'arc. Dans l'arc à courant continu, on sait depuis longtemps que la caractéristique est tombante. La conductibilité du gaz de l'arc croît avec l'intensité de courant assez fortement pour que la chute de tension soit plus élevée aux faibles intensités qu'aux fortes intensités. Si l'on tient compte de la caractéristique de l'arc à courant continu, on comprend comment le phénomène peut exister et l'on voit pourquoi, avec une tension agissante élevée et une grande résistance en circuit, le phénomène est plus facile à

(1) *Éclairage Électrique*, t. XLIV, 29 juillet 1905, p. 144.

obtenir, car, dans ce cas, la chute de la caractéristique est beaucoup plus rapide. Au contraire, la considération de la caractéristique ne permet pas d'expliquer un grand nombre d'autres faits parmi lesquels on peut citer les suivants :

a) Les charbons homogènes seuls présentent la propriété de produire des oscillations, puisque les charbons à mèche présentent aussi une caractéristique tombante.

b) La fréquence des oscillations produites est déterminée par la valeur C_2 et L_2 du circuit oscillant et croît, quand $C_2 L_2$ décroît, d'après la loi :

$$n = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_2 L_2}}.$$

Elle croît aussi, toutes autres conditions restant les mêmes, quand la longueur de l'arc diminue, ou quand l'intensité du courant principal augmente.

c) Si l'on augmente de plus en plus la fréquence n par diminution de C_2 et L_2, on arrive finalement à une limite pour laquelle l'arc ne produit plus d'oscillation. Cette limite est atteinte pour $n = 40\,000$ [1] environ. La théorie des causes de la production des oscillations permet de voir de quelle façon l'on peut élever cette limite.

4° La théorie de l'arc chantant repose sur l'étude générale publiée antérieurement par l'auteur sur la dynamique de l'arc [2]. Dans cette étude, l'auteur a montré que la caractéristique dynamique d'un arc, c'est-à-dire la caractéristique sur courant alternatif, est différente de la caractéristique statique présentée par l'arc sur du courant continu. La caractéristique à courant alternatif présente de plus faibles valeurs de la tension quand l'intensité du courant diminue. Ce phénomène, désigné par l'auteur sous le nom d'hystérésis de l'arc, dépend, d'une façon compliquée en apparence, de la longueur de l'arc, de la nature des électrodes, de la nature du gaz environnant, de l'intensité maxima du courant, de la forme et de la fréquence du courant alternatif, etc. L'auteur a donné de ce phénomène une théorie qui est en accord satisfaisant avec les faits observés et a permis d'expliquer un certain nombre de points encore obscurs. Comme il l'a indiqué dans cette étude, les phénomènes présentés par l'arc chantant doivent être expliqués aussi par l'hystérésis de l'arc.

5° Au moyen d'un oscillographe à haute fréquence de Duddell, l'auteur a déterminé les courbes de courant et de tension d'un arc chantant et a construit, d'après ces courbes, les caractéristiques de l'arc. Ces courbes présentent les particularités typiques suivantes :

Le courant alternatif i_2 passant dans le circuit dérivé se superpose dans l'arc au courant continu J_0 pour donner un courant ondulé. La portion alternative i'_1 de ce courant ondulé est décalée de 180° environ sur le courant alternatif du circuit dérivé, c'est-à-dire croît quand celui-ci décroît, et inversement, comme l'indique la discussion théorique qui précède. La figure 1 reproduit une caractéristique tracée d'après les

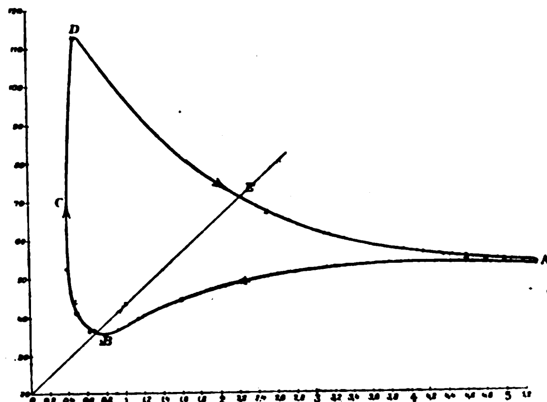


Fig. 1.

courbes obtenues. L'arc avait 3 millimètres de longueur, la tension totale était de 220 volts, la différence de potentiel aux bornes de l'arc était de 71 volts, le courant J_0 avait une intensité de 2,22 ampères, la capacité C_2 était de 15 microfarads ; la self-induction L_2 de 0,007 henrys et la fréquence d'environ 450 périodes par seconde.

On voit que la différence de potentiel de l'arc passe par des valeurs plus élevées pour un courant croissant que pour un courant décroissant et que la caractéristique forme un cycle d'hystérésis. Le phénomène se produit périodiquement de la façon suivante. Après que le courant i_2 dans le circuit dérivé a dépassé son minimum, et le courant i_1 dans l'arc son maximum (point A, fig. 1) le courant de l'arc diminue rapidement, parce que le circuit dérivé absorbe du courant pour la

[1] Voir pour cette limite Wertheim Salomonson, *Éclairage Électrique*, tome XXXVIII, 23 janvier 1904, p. 144.

[2] *Éclairage Électrique*, tome XLIV, pages 144, 180 et 228.

charge de sa capacité. Le cratère négatif, ne perdant que lentement l'état d'incandescence qu'il a atteint au moment du maximum du courant, il émet encore facilement des électrons, la conductibilité de l'arc reste élevée, et la chute de tension dans l'arc reste faible. La différence de potentiel de l'arc s'abaisse aux valeurs relativement faibles de la branche ABC du cycle. Peu à peu, après que le courant dérivé a atteint son maximum, le courant de l'arc croît à nouveau. Mais, pendant ce temps, le cratère négatif s'est refroidi de plus en plus, et la conductibilité de l'arc est devenue de moins en moins bonne. La même intensité du courant croissant produit donc une chute de tension plus forte que précédemment quand le courant décroissait. Le courant correspond à la branche des différences de potentiel plus élevées CDA du cycle d'hystérésis. La différence de potentiel aux bornes de l'arc croît donc d'abord jusqu'à ce que la force vive communiquée aux électrons par la chute de tension suffise à augmenter la conductibilité par les chocs ioniques et à augmenter l'intensité du courant à un tel point que la cathode redevienne incandescente (point D). A partir de ce point, la différence de potentiel tombe rapidement quand le courant continue à croître. Quand la capacité du circuit dérivé est entièrement chargée (E), elle commence à se décharger à travers l'arc et augmente l'intensité du courant jusqu'à ce que celle-ci atteigne son maximum (point A) correspondant à la décharge complète de la capacité. Le phénomène recommence alors à nouveau.

On voit que, dans tous les cas, il existe une caractéristique « tombante » mais que l'hystérésis introduit dans cette caractéristique des portions montantes (CD et AB). Tant que l'influence de ces portions est inférieure à celle des portions tombantes, la condition 1 peut être remplie, bien que les portions montantes représentent une absorption d'énergie du circuit dérivé.

Les conditions de variation d'énergie ne peuvent d'ailleurs pas être déterminées d'après la caractéristique *ei*. On peut, par contre, les étudier et avoir une idée de la condition représentée par l'équation 1 au moyen d'une représentation graphique de M. Barkhausen. Si, avec l'aide de l'oscillographe double, on trace la courbe de tension de l'arc chantant e_2 et de la capacité C_2 du circuit oscillant, et si l'on porte les valeurs de la dernière en abscisses et celles de la première en ordonnées, on obtient une courbe dont la surface est directement proportionnelle à $\int_0^T e_2 i_2 dt$. En effet on a :

$$e_C = \frac{1}{C_2}\int i_2 dt; \quad de_C = \frac{1}{C_2} i_2 dt$$

$$e_2 de_C = \frac{e_2 i_2 dt}{C_2} = \frac{(E_2 + e_2') i_2 dt}{C_2}.$$

L'intégration pour une période entière donne une surface égale à

$$\frac{1}{C_2}\int e_2' i_2 dt.$$

Les portions de surface dont la ligne enveloppante est parcourue dans le sens opposé au sens des aiguilles d'une montre sont négatives. Les conditions 1 expriment que les surfaces du premier genre doivent surpasser celles du second genre, c'est-à-dire qu'il y a plus d'énergie absorbée que cédée par le circuit.

(A suivre.) R. V.

Sur le dégagement d'énergie et la résistance apparente de l'étincelle électrique. — **J. Koch.** — *Drudes Annalen*, juillet 1906.

La détermination des potentiels résiduels dans les décharges continues des condensateurs à travers des résistances de différentes valeurs a permis à l'auteur de calculer les caractéristiques de l'étincelle qui concordent avec la caractéristique de l'état stationnaire. Ces caractéristiques peuvent être exprimées d'une façon satisfaisante par la formule $V = a + (b/i)$, i et V désignant l'intensité de courant et la différence de potentiel aux électrodes, a et b des fonctions de la longueur d'arc.

Cela a permis un calcul approximatif du dégagement d'énergie et de la résistance apparente de l'étincelle dans le cas considéré. En introduisant l'expression pour le dégagement d'énergie, Heydweiller a donné récemment à l'équation différentielle de Thomson-Kirchhoff pour la décharge d'un condensateur une forme plus générale, et a vérifié les résultats de l'auteur. Mais un point est resté obscur, c'est celui de la résistance apparente de l'étincelle. Celle-ci est égale à la différence de potentiel V entre électrodes divisée par l'intensité de courant correspondant i, c'est-à-dire $R = V/i$ ou $R = (a/i) + (b/i^2)$.

On voit immédiatement que R doit varier avec l'intensité du courant, c'est-à-dire pendant la décharge. Les deux valeurs R_k et R_{min} calculées par l'auteur correspondent à la plus petite et à la plus grande intensité de courant et sont approximativement les limites entre lesquelles oscille la résistance apparente de l'étincelle pendant une décharge.

L'énergie dépensée dans l'étincelle pendant le temps dt peut être exprimée de la façon suivante : $df = Vidt$;
d'après la définition de R, on peut aussi bien écrire : $df = Ri^2dt$
où R, ainsi que V, est fonction de i.

Dans les décharges oscillantes, les intensités de courant sont beaucoup plus considérables, et les limites de la résistance doivent être d'autant plus étroites, même si les constantes a et b de l'étincelle étaient les mêmes que pour une décharge à travers un conducteur de grande résistance. Suivant que l'on a affaire à une étincelle en arc ou à une étincelle en effluve, les constantes doivent avoir une valeur différente : à l'état stationnaire on a, en tout cas, les caractéristiques essentiellement différentes.

On a essayé de différentes façons d'obtenir une valeur moyenne pour la résistance d'étincelle d'une décharge oscillante. Heydweiller a calculé la résistance R au moyen de la formule de Thomson

$$\tau = 2\pi \sqrt{\frac{pc}{1 - \frac{r^2c}{4p}}}$$

p et c étant la self-induction et la capacité du conducteur, r la somme des résistances dans celui-ci (w) et dans l'étincelle (R). Il est évident que cette valeur R représente une certaine valeur moyenne pour la résistance apparente de l'étincelle.

Lindemann a calculé la résistance moyenne de l'étincelle x en partant de l'énergie E_F dans l'étincelle. Cette résistance moyenne a été définie par la formule

$$E_F = E \frac{x}{x + w}$$

où E désigne la dépense totale d'énergie dans le circuit de fermeture et w la résistance intercalée. Cette définition peut être aussi bien exprimée par la formule

$$\int \xi i^2 dt = x \int i^2 dt$$

en appelant ξ la valeur instantanée de la résistance de l'étincelle et x la valeur moyenne de la résistance apparente.

L'auteur a trouvé comme valeur limites R_k et R_{min}, pour une distance explosive de 2 millimètres et 855000 ohms dans le circuit de fermeture :

$$R_k = 1\,280\,000$$
$$R_{min.} = 69\,000$$

Heydweiller a trouvé, pour une distance explosive de 2 millimètres et une résistance de 855 000 ohms :

$$E_F = 0{,}038 \text{ joule}$$
$$E = 0{,}402 \text{ joule}$$

d'où l'on tire : $x = 855\,000 \dfrac{0{,}038}{0{,}402 - 0{,}038}$ $= 89\,000$ ohms environ. Ce résultat concorde bien avec celui de l'auteur. Dans un autre cas, Heydweiller a trouvé, pour une distance explosive de 2 millimètres et une résistance de 11,90 mégohms :

$$E_F = 0{,}043 \text{ joule}$$
$$E = 0{,}087 \text{ joule}$$

d'où $x = 11{,}6$ mégohms.

Les limites correspondantes pour la résistance apparente de l'étincelle sont $R_k = 13{,}5$ mégohms et $R_{min} = 6{,}9$ mégohms.

Ces résultats présentent une bonne concordance entre eux.

B. L.

GÉNÉRATION ET TRANSFORMATION

***Dynamos génératrices à courant continu à grande vitesse et à tension élevée.* — H. M. Hobart.** — — *The Electrician*, 29 juin 1906.

Par suite du développement rapide de la turbine à vapeur, la question de la construction de dynamos génératrices à courant continu à grande vitesse de rotation et à haute tension a pris une importance considérable. L'établissement et la construction de ces machines présentent de grandes difficultés et méritent d'être étudiés en détail.

La plus faible vitesse que peut adopter le constructeur de la turbine à vapeur est encore beaucoup trop élevée au gré du constructeur de la génératrice à courant continu entraînée par cette turbine. L'emploi de pôles de commutation, sur lesquels le Dr Breslauer a publié une intéressante

étude [1] a permis de résoudre la question d'une façon satisfaisante. Les pôles de commutation doivent être proportionnés de façon à surmonter la tension de réactance: leur longueur axiale peut être beaucoup plus courte que celle de l'induit. Le collecteur doit être établi de telle sorte qu'il ne s'échauffe pas d'une façon anormale : son diamètre doit être petit de façon à éviter les vitesses périphériques trop considérables ; on sait que, plus la vitesse périphérique est faible et plus le fonctionnement des balais en carbone est satisfaisant, toutes les autres conditions étant les mêmes. Il faut aussi, avec des balais en charbon, réduire la densité de courant à une faible valeur. Par suite, plus est faible le diamètre du collecteur et plus doit être grande la longueur de cet organe. Les nouveaux balais en graphite ou en cuivre, ou en composition contenant du carbone et du cuivre, donneraient peut-être de meilleurs résultats que les balais ordinaires au point de vue de la densité du courant, mais, malgré tout, plus la densité de courant dans les balais sera faible, et meilleur sera le fonctionnement du collecteur. Étant donnée l'importance de ces questions, l'auteur a récemment établi un certain nombre de projets de dynamos génératrices à courant continu à grande vitesse de rotation pour des puissances atteignant 4000 kilowatts et des tensions atteignant 4000 volts. D'une façon générale, les difficultés diminuent quand la tension augmente. Le projet d'une dynamo de 4000 kilowatts, 2000 volts, 500 tours par minute établi par l'auteur offre d'autant plus d'intérêt que, jusqu'ici, on a admis qu'une puissance de 4000 kilowatts ne pouvait être obtenue qu'avec des alternateurs et non avec des génératrices à courant continu. Ce projet ayant donné lieu à des études spéciales, l'auteur ne peut le publier, mais pense que le projet d'une dynamo de 1000 kilowatts à 1000 volts et 1000 tours par minute pourra donner d'utiles indications. La machine dont il s'agit est représentée en élévation et en coupe par les figures 1 et 2, sur lesquelles les cotes sont exprimées en millimètres.

Induit. — L'induit est formé de tôles assemblées de $0^{mm},5$ d'épaisseur, placées sur une lanterne en fonte bien ventilée. La vitesse périphérique est de $52^{m},5$ par seconde. Des cales en bois dur maintiennent les conducteurs dans les encoches. Les têtes de bobines induites sont maintenues en place par une double couche de frettes en fils d'acier, isolés des conducteurs induits par une couche de mica.

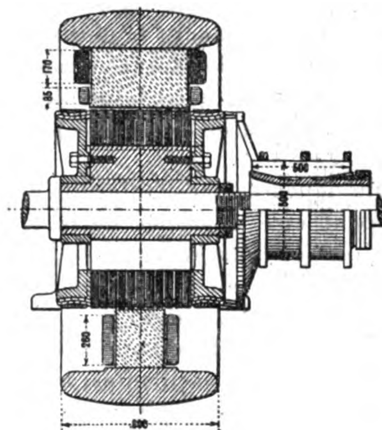


Fig. 1. — Génératrice de 1000 kw., 6 pôles, 1000 volts, 1000 tours par minute.

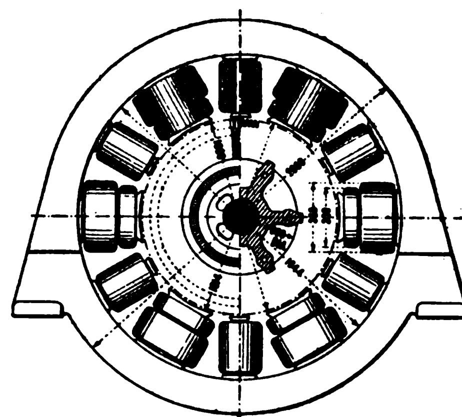


Fig. 2.

Collecteur. — Cet organe est formé d'un tambour en fonte permettant l'accès de l'air à son intérieur. Les lames sont maintenues par trois bagues d'acier placées sur des bandes de mica. La vitesse périphérique est de 26 mètres par seconde, chiffre relativement faible pour ce genre de machines.

Balais. — Les balais sont en carbone et sont supportés par des porte-balais prévus pour éviter des vibrations excessives aux vitesses élevées.

Carcasse. — La culasse est en fonte en deux pièces, les noyaux sont en acier coulé de section allongée avec angles arrondis.

Pôles de commutation. — Ceux-ci sont en acier

[1] Voir *Éclairage Électrique*, 2 septembre 1905, p. 346.

coulé et sont placés au milieu des intervalles séparant les pôles principaux. Leur enroulement consiste en 23 tours d'une bande de cuivre enroulée de champ. Un rhéostat est placé en parallèle avec cet enroulement et est réglé pour donner une bonne commutation à toutes les charges.

Le tableau suivant indique tous les chiffres caractéristiques de cette machine de 1 000 kilowatts sous 1 000 volts à 1 000 tours par minute.

Nombre de pôles	6	
Puissance normale	1 000	
Vitesse par minute (tours)	1 000	
Fréquence par seconde	50	
Différence de potentiel (volts)	1 000	
Courant (ampères)	1 000	

DIMENSIONS GÉNÉRALES.

INDUIT.

Diamètre extérieur des tôles	100	cm.
Diamètre au fond des encoches	92	
Diamètre intérieur des tôles	60	
Longueur du noyau	50	
Nombre de couronnes de ventilation	8	
Longueur de chaque couronne	1	
°/₀ d'isolant sur les tôles	10	
Longueur effective du noyau	36	
Nombre d'encoches	162	
Profondeur d'une encoche	4	
Largeur —	1,07	
Longueur des encoches assemblées	1,04	
Largeur moyenne d'une dent	0,8	

INDUCTEUR.

Longueur axiale d'une face polaire	50	
Longueur moyenne de l'arc polaire	29	
Longueur axiale d'un noyau	49	
Largeur d'un noyau	18	
Épaisseur d'une pièce polaire au centre de l'arc	2,0	
Hauteur radiale d'un noyau	27	
Valeur de l'entrefer simple	0,7	

Culasse.

Diamètre extérieur	200	
— intérieur	164	
Épaisseur	17,5	
Largeur axiale	80	

Pôles de commutation.

Longueur axiale de la face polaire	25	
Longueur de l'arc polaire	10	
Valeur de l'entrefer simple	0,8	
Longueur axiale du noyau	25	
Largeur du noyau	8	
Section en cmq	184	

DIMENSIONS ÉLECTRIQUES.

Nombre des conducteurs	648	
— d'encoches	162	
— de conducteurs par encoche	4	
Nombre de circuits induits	6	
Ampères totaux	1 000	
Ampères par circuit	167	
Longueur moyenne d'un tour	230	cm.
Nombre de tours en série entre balais	54	
Longueur totale de circuit entre balais	12 400	cm.
Haut. des conducteurs en barres	1,48	
Largeur	0,28	
Section en cmq. d'un conducteur	0,392	
Section de tous les conducteurs en parallèle	2,34	
Résistance entre balais à 60° en ohms	0,0106	

Collecteur.

Diamètre du collecteur	50	cm.
Nombre de lames	324	
Épaisseur d'une lame et de l'isolant	0,485	
Longueur totale	50	cm.
Nombre de lignes de balais	6	
Nombre de balais par ligne	14	
Longueur d'un balai	2	cm.
Longueur de l'arc de contact	2	
Surface de contact par balai	4	cmq.
Ampères par cmq. de surface	6	
Vitesse périphérique	26	
Tension de réactance	20	

GRANDEURS MAGNÉTIQUES.

Différence de potentiel	1 000	
F. é. m. induite totale	1 020	
Flux dans l'induit par pôle en charge	$9,5 \cdot 10^6$	
Facteur de dispersion	1,35	

Flux produit par pôle à pleine charge	$12,4 . 10^6$

Ampère-tours à vide.

	Induction.	Ampère-tours par pôle.
Noyau induit	8 250	70
Dents	20 700	1 720
Entrefer	7 200	4 030
Noyaux	15 200	1 400
Culasse	4 550	1 000
Ampère-tours totaux à vide		8 224
— tours fournis par l'enroulement shunt		8 000
— tours fournis par l'enroulement-série		4 800

ENROULEMENTS INDUCTEURS.

Bobines shunt.

Longueur axiale de l'enroulement	17 cm.
Épaisseur axiale de l'enroulement	8
Ampères dans l'enroulement	2,25
Densité de courant par cmq.	132
Pertes en watts par bobine	314
Poids de cuivre par bobine	81 kgr.

Bobines série.

Dimensions du conducteur	6×0,47 cm.
Nombre de conducteurs en parallèles	2
Section totale en cmq.	5,65
Nombre de tours par bobine	6,5
Courant dans l'enroulement	740
Densité de courant par cmq.	130
Pertes en watts par bobine	180
Poids de cuivre	47 kgr.

Bobines des pôles auxiliaires.

Longueur de l'enroulement	26 cm.
Épaisseur	6
Dimensions du conducteur	6×0,45
Nombre en parallèle	2
Section totale en cmq.	5,4
Tours par bobine	23
Pertes en watts par bobine	340
Densité de courant par cmq.	116
Kilogrammes de cuivre	91

PERTES DANS L'INDUIT.

Pertes dans le cuivre.

Ampères totaux	1 000
Résistance à 60° entre balais	0,0106
Pertes en watts	10 600
Poids du cuivre	260 kgr.

Pertes dans le fer.

Poids total des tôles	120 kgr.
Induction dans le noyau	8 250
Fréquence par seconde	50
Pertes totales en watts	14 000
Pertes par frottements et ventilation	4 000

Échauffement.

Pertes dans l'induit en watts par dcmq.	91
Pertes dans le collecteur en watts par dcmq.	69
Pertes dans les bobines shunt en watts par dcmq.	10,7
Pertes dans les bobines série en watts par dcmq.	15
Pertes dans les bobines auxiliaires en watts par dcmq.	15

Pertes totales.

Pertes totales constantes	22 840
— variables	17 810
TOTAL	40 650
Rendement commercial	96 %

POIDS DE MATÉRIAUX ACTIFS.

Cuivre de l'induit	260 kgr.
— du collecteur	470
— des bobines shunt	488
— des bobines série	282
— des bobines auxiliaires	550
Tôles	1 200
Noyaux inducteurs	2 140
Noyaux pôles auxiliaires	260
Culasse (fonte)	12 000
POIDS TOTAL des matériaux actifs	17 650 kgr.
Prix par kilowatt	9 fr. 26.

R. V.

Sur les pertes dans le fer des moteurs à collecteur à courant alternatif. — Niethammer. — *Elektrotechnik und Maschinenbau*, 10 juin 1906.

On sait qu'il existe différentes sortes d'aimantation, l'aimantation linéaire ou tournante, lente ou rapide. Dans les moteurs à collecteur à courant alternatif, il se produit une combinaison de l'aimantation linéaire alternative rapide avec

l'aimantation tournante. La question se pose de savoir s'il faut calculer les pertes dans le fer comme si chacune des aimantations existait seule et additionner les résultats ainsi trouvés, ou bien si les deux aimantations se combinent entre elles d'une façon quelconque. Il est presque impossible de répondre théoriquement à cette question. On trouve, parmi les auteurs qui s'en sont occupés, deux points de vue différents. D'après Steinmetz, les pertes dans le fer du stator et du rotor d'un moteur série monophasé dépendent, jusqu'à la vitesse du synchronisme, de la fréquence n du réseau : au delà de cette vitesse, les pertes dans le rotor dépendent de la fréquence de rotation $n_r = up/60$, u étant la vitesse de synchronisme et les pertes dans le stator dépendent de la fréquence n. D'après Heubach, les pertes dans le fer ne dépendent que de n et non de n_r.

Les pertes dans le fer des moteurs à répulsion ou à répulsion compensés peuvent très difficilement être déterminées expérimentalement par un essai au frein après lequel on soustrait des pertes totales les pertes individuelles calculables, car la détermination de celles-ci, et en particulier des pertes de commutation est presque impossible. Au contraire, pour le moteur série simple ou à bobine transversale, on peut déterminer expérimentalement les pertes dans le fer en employant pour cela une combinaison connue de la méthode du moteur auxiliaire avec une mesure au wattmètre. Si l'on excite l'inducteur F du moteur à collecteur au moyen d'un courant alternatif W_e produit par un générateur, et si l'on entraîne l'induit, absolument séparé du réseau, par un moteur auxiliaire à courant continu H, une partie du travail d'aimantation est fournie par le courant alternatif W_e et est mesurée par le wattmètre W, et une partie, déterminée par la tension E_c et le courant I_c absorbé, est fournie par le moteur auxiliaire H. En tous cas, la somme des lectures du wattmètre et le supplément d'énergie absorbé par le moteur H quand l'inducteur F est excité, représente le travail d'aimantation total, à condition que l'on effectue les corrections nécessaires pour les pertes ohmiques et que l'on emploie un moteur de puissance supérieure à la puissance nécessaire. L'énergie absorbée à vide par ce moteur, quand l'inducteur F n'est pas excité, est déterminée avant et après l'essai. On mesure en outre la différence de potentiel primaire E_1 aux bornes de l'inducteur F et la différence de potentiel E_r aux bornes de l'induit R. De ces deux valeurs, on peut déduire le flux K_f dans l'inducteur et le flux K_a dans l'induit. Dans les essais faits par l'auteur, le wattmètre était muni d'une forte résistance en série, et les balais de l'induit avaient été tous soulevés sauf deux, de très faible épaisseur, de façon à éviter tout couple et toute perte supplémentaires. Pour l'entraînement et l'excitation du moteur auxiliaire, on employait des accumulateurs. Un commutateur permettait de répéter la même expérience avec du courant continu afin d'établir des comparaisons.

Les essais furent faits sur un moteur série simple, de 7 chevaux, 1 500 tours, 110 volts, 50 périodes, 4 pôles. Le diamètre extérieur du rotor était de 337 millimètres ; la longueur axiale de fer de 96 millimètres ; l'entrefer de 1,5 millimètres ; le diamètre extérieur des tôles du stator de 520 millimètres. Le stator et le rotor portaient tous deux un enroulement à courant continu couvrant toute la périphérie (enroulement ondulé avec $a = 1$; 262 conducteurs primaires et 288 conducteurs secondaires ; encoches mi-fermées au stator ; encoches ouvertes au rotor). Pour le plus grand flux employé $K_a = 0,67 . 10^6$, l'induction dans l'induit et le noyau du stator est égale à 6 000 environ, et l'induction dans les dents est au maximum 13 000. Des relevés oscillographiques avaient montré que les tensions E_1 et E_r étaient à peu près sinusoïdales : dans ces conditions, on a admis que, lors du passage à l'aimantation à courant continu, un flux maximum $\sqrt{2}$ fois plus grand correspond à la tension E_r sur courant alternatif que sur courant continu.

L'auteur publie deux séries de courbes tracées pour des flux dans l'induit $K_a = 0,67 . 10^6$ et $K_a = 0,45 . 10^6$. Ces courbes, tracées en fonction de la vitesse de rotation pour deux fréquences différentes, 35 et 50 périodes, indiquent les pertes dans le fer totales pour 50, 35 et 0 périodes, les indications du wattmètre w, et la puissance absorbée par le moteur auxiliaire. La forme de ces courbes est surprenante. Les pertes dans le stator (énergie électrique fournie) sont à peu près constantes à toutes les vitesses pour une fréquence donnée : au contraire, les pertes représentées par la puissance mécanique fournie par le moteur auxiliaire croissent très rapidement avec la vitesse de rotation : pour de faibles fréquences

elles sont plus grandes que pour des fréquences élevées, à l'inverse des précédentes. La courbe des pertes totales dans le fer est d'autant plus plate que la fréquence est plus élevée. Tandis que, pour une fréquence nulle, les pertes dans le fer croissent rapidement avec la vitesse de rotation, pour les hautes fréquences les pertes semblent rester presque constantes à toutes les vitesses de rotation. En outre, les courbes de pertes totales se coupent pour différentes fréquences. On peut résumer ces résultats de la façon suivante : à l'arrêt et pour des vitesses de rotation inférieures au synchronisme, les pertes totales dans le fer d'un moteur série monophasé sont plus grandes que celles du même moteur alimenté par du courant continu : au voisinage du synchronisme, les pertes totales dans le fer ont la même valeur sur courant alternatif et sur courant continu ; au delà du synchronisme, les pertes dans le fer sont de plus en plus petites pour le courant alternatif par rappport au courant continu, en supposant la même valeur du flux.

Les deux mesures de l'énergie électrique et de l'énergie mécanique absorbées ne permettent pas de séparer les pertes dues à l'aimantation linéaire et celles dues à l'aimantation tournante. Une étude approximative de la relation entre les pertes dans le fer et l'induction B a montré que les pertes dépendent de la puissance 1,5 à 1,9 de B, la puissance la plus élevée s'appliquant aux faibles fréquences et aux vitesses de rotation élevées, tandis qu'aux faibles vitesses l'exposant est plus grand pour les fréquences élevées que pour les fréquences faibles. On peut en conclure qu'aux vitesses de rotation élevées, il doit se produire des courants de Foucault très importants qui dépendent du carré de la fréquence de rotation $n_r = up/60$, mais qui diminuent de plus en plus quand la fréquence du courant alternatif croît et doivent presque disparaître pour les fréquences élevées. Ces pertes supplémentaires sont bien connues pour les machines à courant continu et particulièrement pour les moteurs triphasés : elles sont dues en partie aux variations des lignes de force produites par les ouvertures des encoches.

L'auteur a essayé, en s'appuyant sur les lois connues de l'hystérésis et des courants de Foucault, d'établir d'après les courbes des formules usuelles pour le calcul des pertes dans le fer des moteurs à collecteur. Pour des fréquences comprises entre 0 à 60, les formules suivantes pour les pertes dans le fer d'un moteur série monophasé à bobine transversale doivent donner des valeurs satisfaisantes.

Hystérésis dans le stator :

$$\sigma\left(\frac{n}{100}\right)\left[\left(\frac{B_1}{1\,000}\right)^{1,5} V_s + \left(\frac{B_{z1}}{1\,000}\right)^{1,8} V_{zs}\right]. \quad (1)$$

Courants de Foucault dans le stator :

$$cs^2\left(\frac{n}{100}\right)^2\left[\left(\frac{B_1}{1\,000}\right)^2 V_s + \left(\frac{B_{z1}}{1\,000}\right)^2 V_{zs}\right]. \quad (2)$$

Hystérésis dans le rotor :

$$\left[\sigma\left(\frac{n}{100}\right) + \sigma'\left(\frac{n_r}{100}\right)(1 - bn)\right]\left[\left(\frac{B_2}{1\,000}\right)^{1,6} V_r + \left(\frac{B_{z2}}{1\,000}\right)^{1,6} V_{zr}\right]. \quad (3)$$

Courants de Foucault dans le rotor :

$$s^2\left[c\left(\frac{n}{100}\right)^2 + c'\left(\frac{n_r}{100}\right)^2(1 - bn)^2\right]\left[\left(\frac{B_2}{1\,000}\right)^2 V_r + \left(\frac{B_{z2}}{1\,000}\right)^2 V_{zr}\right]. \quad (4)$$

Dans ces formules, n désigne la fréquence du réseau, B_1 l'induction dans le stator, B_{z1} l'induction dans les dents du stator, s l'épaisseur des tôles en millimètres, V_s le volume du noyau du fer du stator en décimètres cubes, V_{z1} le volume des dents du stator en décimètres cubes, B_2 l'induction dans le noyau du rotor, B_{z2} l'induction dans les dents du rotor, V_r le volume du noyau du rotor en dents, V_{zr} le volume des dents du rotor, $n_r = up/60$, u la vitesse de rotation, $2p$ le nombre de pôles. Les inductions sont partout les valeurs maxima. Pour les coefficients dépendant des tôles, et du mode de construction, on a trouvé pour le moteur étudié :

$$\sigma = \sigma' = 0,8 \text{ à } 1,2\,; \quad c = 1,8 \text{ à } 2,5\,;$$
$$c' = 20 \text{ à } 25\,; \quad b = 0,011.$$

Les valeurs de σ, σ' et c ne présentent rien d'anormal : la valeur de c' au contraire est surprenante : dans cette valeur sont comprises toutes les pertes supplémentaires par courants de Fou-

cault, dépendant de n_r^2 ou de $n^2 n_z^2 = (n_r n_z/p)^2$. Dans le cas dont il s'agit, la fréquence des encoches $(n_r n_z/p)$ est égale à 33 n_r.

Pour le moteur à répulsion et le moteur à répulsion compensé, on peut se servir des formules 1 et 2, mais les formules relatives au rotor doivent être modifiées à peu près de la façon suivante.

Hystérésis dans le rotor :

$$\left[\sigma\left(\frac{n_s}{100}\right)+\sigma'\left(\frac{n_r}{100}\right)\right]\left[\left(\frac{B_2}{1\,000}\right)^{1,6} V_r+\left(\frac{B_{z2}}{1\,000}\right)^{1,6} V_{zr}\right]. \qquad (5)$$

Courants de Foucault dans le rotor :

$$s^2\left[c\left(\frac{n_s}{100}\right)^2+c'\left(\frac{n_r}{100}\right)^2\right]\left[\left(\frac{B_2}{1\,000}\right)^2 V_r+\left(\frac{B_{z2}}{1\,000}\right)^2 V_{zr}\right]. \qquad (6)$$

Le glissement $n_s = n - n_r$ est toujours compté positivement. Les termes en n_r représentent les pertes supplémentaires.

Les deux dernières formules (5) et (6) sont valables, presque sans modification, pour la partie secondaire de moteurs polyphasés à champ tournant. On sait que les pertes dans le fer des moteurs asynchrones ne diffèrent pas beaucoup à l'arrêt et au synchronisme, où la fréquence d'aimantation du rotor est nulle et où, théoriquement, les pertes devraient être nulles aussi. D'après ces considérations théoriques, les pertes dans le fer au synchronisme devraient être seulement la moitié des pertes à l'arrêt, où le rotor est soumis à une aimantation à la fréquence n du réseau. En réalité, il se produit dans le rotor avec les vitesses croissantes des pertes supplémentaires qui dépent de $un_z/60 = n_r n_z/p$ et qui compensent plus ou moins la diminution des pertes dans le rotor, dépendant de $n_s = n - n_r$.

Finalement, l'auteur a poursuivi les essais de ce moteur pour contrôler les formules approximatives de calcul de la tension de dispersion. Les différences de potentiel E_1 et E_r furent mesurées et furent trouvées peu différentes l'une de l'autre au synchronisme, les nombres de tours d'enroulements primaire et secondaire étant presque égaux. Pour un courant du stator de 99 ampères, l'auteur a trouvé, par exemple, pour $n = 50$, $E_1 = 126$ volts et $E_r = 99$ volts pour $n_r = 50{,}4$ ($n = 1\,514$ tours). Le flux K_a dans le rotor est égal à $1{,}06 \cdot 10^6$ et le flux K_f dans le stator à $1{,}24 \cdot 10^6$. Le flux de dispersion primaire est donc $K_s = 0{,}18 \cdot 10^6$ ou environ 15 °/₀ de K_f. La tension de dispersion primaire E_{sf} est donc d'environ 15 °/₀ de E_1 ou 18,3 volts.

Pour E_{sf}, l'auteur a établi la formule approchée suivante :

$$E_{sf} = \frac{nZ_f'^2}{p}(\alpha l + \beta\tau)\frac{J_f}{2b}, \qquad (7)$$

formule dans laquelle n désigne la fréquence, Z_f' le nombre de conducteurs inducteurs par branche, l la longueur axiale du fer, τ le pas polaire, J_f le courant inducteur et $2b$ le nombre de branches parallèles, $\alpha = 5$ environ, $\beta = 1{,}5$ environ. Ici on avait $n = 50$; $Z_f' = 131$; $l = 9{,}6$ environ ; $\tau = 28$ centimètres ; $J_f = 99$; $sb = 2$; $p = 2$, d'où l'on déduit, d'après la formule, $E_{sf} = 19$ volts. Cette valeur concorde bien avec la valeur 18,3 volts indiquée plus haut. D'autres essais ont donné la même concordance. Si l'on introduit dans la formule les grandeurs relatives au rotor au lieu du stator, on peut calculer aussi la tension de dispersion de l'induit.

R. V.

Moteur série monophasé Siemens-Schuckert (suite) (¹). — **R. Richter.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 14 juin 1906.

III. Utilisation des matériaux actifs.

Pour pouvoir juger de l'utilisation des matériaux actifs, il faut auparavant établir quelques formules pour le couple d'un moteur à collecteur. Ces formules ne seront établies que pour des induits lisses, afin d'éviter les complications qu'introduit la considération des encoches. On sait que, pour une même induction moyenne, le couple est le même dans les deux cas.

Soient $2a$ le nombre des branches parallèles de l'induit et i la valeur instantanée du courant du moteur : un fil placé au moment considéré dans un champ d'induction b exerce un couple

$$c = \frac{i}{2a} blr,$$

l étant la longueur et r le rayon de l'induit.

Soit z le nombre total de fils sur la périphérie

(¹) Voir *Éclairage Électrique*, tome XLVIII, 21 juillet 1906, page 105.

de l'induit, dx un élément de cette périphérie : le couple exercé par cet élément est

$$dC = \frac{zl}{2\pi 2a} ibdx.$$

On suppose $i = J_{max} f(t)$ et $b = B_{max} \varphi(t)$. Par hypothèse, $f(t)$ et $\varphi(t)$ sont des fonctions périodiques du temps t telles que l'on ait

$$-1 \leqslant f(t) \leqslant +1$$
$$-1 \leqslant \varphi(t) \leqslant +1.$$

J_{max} est indépendant de t et x ; B_{max} est indépendant de t mais dépend de x. Soit γ le rapport de la valeur maxima du courant à sa valeur efficace, $\gamma = J_{max}/J$. On obtient, pour le couple total exercé par l'induit d'un moteur à $2p$ pôles à l'instant considéré quand le point $x = 0$ correspond à l'une des zones neutres du moteur (c'est-à-dire au point où sont situés les conducteurs induits court-circuités) :

$$C = \frac{z}{2\pi \cdot 2a} l \int_{x=0}^{x=2\pi r} ibdx = 2p \frac{z}{2\pi 2a} J\gamma f(t) \varphi(t) l \int_{x=0}^{x=\frac{\pi r}{p}} B_{max} dx$$

$$= \frac{p}{a} \frac{z}{2\pi} J\Phi_{max} \gamma f(t) \varphi(t),$$

en appelant Φ_{max} la valeur maxima dans le temps du flux excitateur total. La valeur moyenne dans le temps du couple pour la durée d'une période T est alors :

$$C_{moy} = \frac{p}{a} \frac{z}{2\pi} J\Phi_{max} \gamma \frac{1}{T} \int_{t=0}^{t=T} f(t) \varphi(t) dt. \qquad (10)$$

Comme base pour la comparaison entre le moteur monophasé et le moteur continu, on supposera une même valeur efficace du courant et un même flux maximum. On a alors, en désignant par k une constante :

$$C_{moy} = k\gamma \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \varphi(t) dt.$$

Dans le cas du courant continu, on a $\gamma = 1$, $f(t) = 1$ et $\varphi(t) = 1$. Le rapport des couples pour le courant monophasé et pour le courant continu est donc

$$\frac{C_{moy}}{C'} = \gamma \int_0^T f(t) \varphi(t) dt. \qquad (11)$$

Cette expression est toujours plus petite que 1 et d'autant plus grande que la forme dans le temps de l'induction et du courant se rapproche plus d'une forme rectangulaire. Si l'on pose $f(t) = \sin \omega t$ et $\varphi(t) = \sin (\omega t - \alpha)$, on a $\gamma = \sqrt{2}$ et l'on obtient l'expression :

$$\frac{C_{moy}}{C'} = \frac{\cos \alpha}{\sqrt{2}}. \qquad (12)$$

La valeur de $\cos \alpha$ étant très voisine de l'unité, il en résulte que, pour une forme sinusoïdale du courant et du flux dans le temps, pour une même induction maxima, le même flux excitateur et le même courant efficace, le moteur monophasé ne peut développer qu'un couple égal à 0,7 fois seulement le couple du moteur à courant continu.

Dans cette comparaison, on a supposé la même induction maxima et le même courant efficace. Si l'on alimentait le même moteur d'abord par du courant alternatif et ensuite par du courant continu, l'induction diminuerait dans ce second cas dans le rapport de la valeur efficace à la valeur maxima du courant alternatif. Si l'on pouvait établir le moteur monophasé comme un moteur ordinaire à courant continu c'est-à-dire avec un grand entrefer et sans compensation du flux de l'induit, l'économie de 40 % sur l'enroulement inducteur compenserait en partie la diminution de couple. Mais, au point de vue du facteur de puissance, on ne peut envisager, dans le cas du courant alternatif, que la construction de moteurs à faible entrefer et avec compensation du flux de l'induit. Dans ce mode de construction, il ne faut que peu d'ampère-tours pour la production du flux excitateur, de sorte qu'un supplément de 40 % des pertes dans le cuivre de l'enroulement excitateur n'altèrent que peu le rendement du moteur : toutefois, la diminution du nombre d'ampère-tours d'excitation dans le moteur série monophasé (mais non dans le moteur à répulsion compensé) permettent à un autre point de vue d'élever la puissance, comme on le verra plus loin.

Pour une même induction maxima, les pertes dans le fer du moteur monophasé sont un peu plus grandes que dans le moteur à courant continu, car il se produit dans le stator des pertes

supplémentaires. C'est vrai aussi pour les moteurs à champ tournant plus ou moins parfait travaillant à des vitesses variables. L'hypothèse d'une même intensité efficace du courant correspond à des pertes dans le fer un peu plus élevées dans le moteur à courant continu que dans le moteur à courant alternatif[1]. Si, dans la comparaison, on suppose encore la même vitesse de rotation dans les deux moteurs, à courant continu et à courant monophasé, ce qui a lieu quand, pour un même flux maximum, la force contre-électromotrice est $\sqrt{2}$ fois plus grande pour le courant continu que la valeur efficace dans le cas d'un courant sinusoïdal, on trouve à peu près les mêmes pertes pour le moteur à courant continu et pour le moteur à courant monophasé, tandis que la puissance de ce dernier est $1/\sqrt{2}$ fois plus faible que celle du premier. Une forme appropriée de la courbe de tension du courant monophasé permettrait d'augmenter la puissance du moteur alternatif pour une même valeur des pertes, mais cela ne serait possible qu'au détriment de la commutation.

Pour élever la puissance du moteur sans modifier les pertes, il n'existe qu'un moyen pour une forme donnée de la courbe de différence de potentiel aux bornes. Il faut, d'après l'équation 10, donner à Φ_{max} la plus grande valeur possible sans modifier la valeur maxima dans le temps de l'induction. On arrive à ce résultat en choisissant une valeur de l'arc polaire aussi grande que possible par rapport au pas polaire et en rendant l'induction aussi uniforme que possible. Les moteurs Siemens-Schuckert sont construits presque exclusivement, dans ce but, avec des stators munis d'encoches, comme ceux des moteurs triphasés, l'enroulement excitateur n'embrassant qu'une dent de moins que le nombre de dents correspondant au pas polaire. On peut de cette manière atteindre facilement dans le moteur monophasé avec une valeur du rapport

$$\frac{\text{arc polaire}}{\text{pas polaire}} = \frac{7}{8} = 0{,}875.$$

Soit Z le nombre des dents d'un pôle choisi aussi élevé que le permet l'espace nécessaire pour les ampère-tours excitateurs : le flux excitateur est alors

$$\Phi_{max} = (Z - 1)\,l B_{max},$$

expression dans laquelle $(Z - 1)l$ est la surface polaire. Dans le moteur à courant continu, il faut, pour produire la même induction, 41,4 % ampère-tours d'excitation supplémentaires que l'on doit placer dans la deuxième encoche, comptée à partir de la dent dans la zone neutre. Pour la même induction maxima, on obtient donc, pour le moteur à courant continu, le flux :

$$\Phi' = (Z - 1)\,l\,\frac{B_{max}}{1{,}414} + (Z - 3)\,l\,\frac{0{,}414\,B_{max}}{1{,}414}.$$

Le rapport du flux dans le moteur alternatif et dans le moteur à courant continu a donc pour valeur

$$\frac{\Phi_{max}}{\Phi'} = \frac{Z - 1}{Z - 1{,}58} \qquad (13)$$

et le rapport des puissances est

$$\frac{L}{L'} = \frac{1}{\sqrt{2}}\,\frac{\Phi_{max}}{\Phi'} = \frac{1}{\sqrt{2}}\,\frac{Z - 1}{Z - 1{,}58}. \qquad (14)$$

Pour $Z = 7$, ce qui correspond au rapport 0,857 de l'arc polaire au pas polaire dans le moteur monophasé, on a

$$\Phi_{max}/\Phi' = 1{,}108 \qquad (13_a)$$

et

$$L/L' = 0{,}785. \qquad (14_a)$$

Le moteur série ainsi établi a donc une puissance inférieure de 21,5 % seulement à celle du moteur à courant continu pour la même induction maxima et la même intensité efficace.

Si l'on compare, en supposant une même valeur de l'induction maxima et une même intensité efficace du courant induit, le moteur série Siemens-Schuckert et le moteur à répulsion compensé dans lequel le flux excitateur est produit par l'enroulement induit uniformément réparti, on a, pour le cas où le fer n'est pas saturé dans le moteur série.

$$\Phi_{max}/B_{max} = kb,$$

k étant une constante et b l'arc polaire. Pour le moteur à répulsion compensé de mêmes dimensions, on a

$$\Phi'_{max}/B_{max} = k(\tau/2),$$

τ étant le pas polaire. Dans le cas où le fer n'est pas saturé, on a donc, pour le rapport de la puis-

[1] Les pertes dans le cuivre sont plus élevées dans le moteur à courant continu, car, pour un même flux excitateur, les ampère-tours de l'enroulement excitateur doivent être de 41 % plus élevés, la différence des pertes dans le cuivre est peut-être un peu plus faible que la différence des pertes dans le fer : la différence résultante est très faible vis-à-vis des pertes totales.

sance du moteur série à celle du moteur à répulsion compensé,

$$L/L' = 2b/\tau. \qquad (15)$$

Donc, si l'on suppose les mêmes dimensions de moteur, la même induction maxima, et la même intensité du courant efficace dans l'induit pour le moteur série Siemens-Schuckert et pour le moteur à répulsion compensé, on a, pour un rapport du pas polaire à l'arc polaire égal à 0,857, une puissance de 71 % plus grande avec le moteur série qu'avec le moteur à répulsion compensé.

Si l'on tient compte de la saturation du fer, la comparaison est un peu plus avantageuse pour le moteur à répulsion compensé. Supposons une saturation de fer assez élevée pour que la répartition triangulaire de l'induction dans le moteur à répulsion compensé se transforme en une répartition sinusoïdale. On obtient alors pour ce moteur : $\Phi'_{max}/B_{max} = k(2\tau/\pi)$

et l'on a : $L/L' = \pi b/2\tau. \qquad (16)$

Pour $b/\tau = 0{,}857$, le moteur série a une puissance de 35 % plus élevée que celle du moteur à répulsion compensé quand, dans celui-ci, l'induction du flux excitateur est uniformément répartie sur la périphérie de l'induit. On voit que le moteur série Siemens-Schuckert est intermédiaire, au point de vue de la puissance entre le moteur à courant continu et le moteur à répulsion compensé, mais est plus proche du premier. Si, pour améliorer le démarrage des deux moteurs, on place des résistances entre l'enroulement et le collecteur, disposées dans les encoches, on peut élever encore la puissance d'environ 10 % par l'emploi de l'enroulement supplémentaire précédemment décrit.

En ce qui concerne les dimensions extérieures du stator, on peut ajouter qu'il est possible, dans le moteur série, d'employer un nombre de pôles presque aussi grand que l'on veut, afin de pouvoir donner au stator de faibles dimensions radiales et une faible longueur : en effet, pour un grand nombre de pôles, le pas polaire et l'espace nécessaire pour l'enroulement dans la direction axiale est plus petit. Dans le moteur à répulsion compensé, le nombre de pôles est déterminé par la vitesse normale et la fréquence du courant alternatif (par exemple, il faut 4 pôles pour une vitesse de 750 tours par minute et une fréquence de 25 périodes par seconde).

(A suivre.) R. V.

TRANSMISSION & DISTRIBUTION

Comparaison entre le système de transmission à courant continu et le système de transmission à courants triphasés. — **Motta.** — *Electrical Review*, 29 juin 1906.

L'auteur a été chargé d'établir, pour la ville de Milan, un rapport sur les avantages relatifs du système de transmission par courant continu et du système de transmission par courants triphasés. Les conditions générales sont les suivantes. Une usine hydro-électrique située dans la Valteline à la partie supérieure de l'Adda doit avoir une capacité suffisante pour produire 38 200 chevaux ou 28 000 kilowatts aux secondaires des transformateurs établis à Milan. La distance de transmission est de 150 kilomètres et il y a lieu de franchir les monts Orobi dont le sommet le plus élevé est situé à 1 650 mètres d'altitude. La comparaison est faite sur la base d'une tension continue de 150 000 volts et d'une tension alternative de 60 000 volts, valeurs les plus économiques pour chaque système. Le système à courant continu comprend dix groupes de quatre générateurs entraînés chacun par une turbine ; la tension d'un groupe est de 10 000 volts. La ligne de transmission comprend un conducteur positif et un conducteur négatif : le point neutre est relié à la terre. Le système triphasé à 60 000 volts comprend un certain nombre d'alternateurs en parallèle, comme dans les installations ordinaires : la fréquence est de 42 périodes.

Les dépenses d'installation afférentes aux deux systèmes sont les suivantes, et comprennent les machines, tableaux, lignes, isolateurs, poteaux, transformateurs, moteurs-générateurs, etc. Les dépenses ainsi calculées présentent une économie de 46 % en faveur du système à courant continu, les totaux s'élevant à 10 000 000 francs par ce système et 10 160 000 francs pour le système à courants triphasés. Cette somme totale se décompose comme suit :

	Courant continu.	Courants triphasés.
Machines y compris transformateurs et tableaux.	7 000 000	3 750 000
Ligne y compris isolateurs, poteaux, parafoudres, etc.	3 000 000	6 410 000

La raison de la grande différence de dépenses pour les machines est dû au prix élevé des génératrices à courant continu et surtout au prix des groupes moteurs-générateurs aux stations réceptrices.

En ce qui concerne le rendement, on peut citer les chiffres suivants : le rendement total des deux systèmes présente une différence en faveur du système triphasé, pour la pleine charge de 28 000 kilowatts. Le rendement du système continu est de 54,2 °/₀, et celui du système triphasé de 55,8 °/₀. L'inconvénient que présente le système à courant continu est la présence de 104 collecteurs en série sur la ligne. Les conducteurs de la ligne ont 240 millimètres carrés dans le système triphasé et 140 millimètres carrés dans le système continu. Les dépenses indiquées ci-dessus comprennent l'intérêt du capital pendant les travaux dont la durée a été supposée la même dans les deux cas. Le prix final de l'énergie livrée à Milan est de 160 francs par kilowatt-an pour le système triphasé. Pour les pointes de charge, on a prévu une usine à vapeur de secours avec une batterie d'accumulateurs, représentant une puissance maxima de 9000 kilowatts.

Le rapport conclut en faveur du système triphasé, en partie pour des raisons techniques, et en partie à cause du meilleur rendement.

R. R.

***Sur les constantes à employer pour le calcul des câbles au point de vue de l'échauffement.* — J. Teichmüller et P. Humann.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 21 juin 1901.

Des études qu'ils ont publiées l'an dernier indépendamment l'un de l'autre[1], les auteurs croient pouvoir tirer les conclusions suivantes :

Les phénomènes qui jouent un rôle dans l'échauffement des câbles souterrains peuvent être tous expliqués physiquement et leurs lois peuvent être exprimées facilement sous une forme mathématique. Les formules relatives à l'état stationnaire de la propagation de la chaleur contiennent, outre des grandeurs données et géométriques (section, diamètres, profondeur) des chiffres arbitrairement fixés (élévation de température) et des constantes des matériaux employés. Le point qui reste à étudier réside dans la détermination de ces constantes.

La détermination des constantes doit toujours contenir en elle-même une vérification de la théorie et une rectification de celle-ci. Si la théorie est ainsi confirmée, le calcul des câbles au point de vue de l'échauffement ne présentera pas plus de difficultés que les autres calculs techniques.

La théorie de l'échauffement des câbles a conduit, pour l'état stationnaire, à la formule suivante :

$$J = \frac{C}{\sqrt{\nu\rho_\tau}} \sqrt{\frac{Q \cdot \tau}{\sigma_{k\tau} \log(D'_a/D'_i) + \sigma_{n\tau} \log(4l/D_a)}}. \quad (1)$$

Dans cette formule, les lettres ont la signification suivante :

$$C = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 10^{-2}}{2,303 \cdot 10^{-4}}} = 16,52$$

ν = nombre de conducteurs dans les câbles.

ρ_τ = résistance spécifique du métal du conducteur en ohms par mètre par millimètre carré à la température correspondant à l'élévation de température e : pour $\tau = 25$ et une température initiale de 15°, on a $\rho_\tau = 0,01925$.

Q = section d'un des ν conducteurs en millimètres carrés.

τ = élévation de température admissible en degrés C°.

$\sigma_{k\tau}$ = résistance calorifique spécifique de l'isolant et du revêtement au-dessous et au-dessus de l'armature en unités électriques.

$\sigma_{n\tau}$ = résistance calorifique spécifique du sol en unités électriques.

D'_a = diamètre extérieur réduit du câble.

D'_i = diamètre du conducteur du câble à un conducteur substitué.

l = profondeur d'enfouissement.

D_a = diamètre extérieur du câble.

Avant d'entreprendre de nouvelles études, les auteurs ont examiné si l'on pouvait simplifier la formule. Pour cela il faudrait réunir en un seul les deux termes logarithmiques des dénominateurs. Cela signifierait que l'espace entre la surface de la terre et la source de chaleur est rempli d'une matière homogène, hypothèse inadmissible d'après les résultats d'expériences entreprises à ce sujet.

Détermination de $\sigma_{k\tau}$. — Pour déterminer la résistance spécifique à la chaleur $\sigma_{k\tau}$ de l'isolant et du revêtement, les auteurs ont fait un certain nombre d'expériences.

Câble à un seul conducteur. — La matière isolante était du jute imprégné et du papier.

[1] Voir *Éclairage Électrique*, tome XLII, 18 mars 1905, p. 422 et tome XLIV, 15 juillet 1905, p. 64.

L'enveloppe de plomb recouvrant le câble était nue et placée sur des rouleaux en porcelaine au-dessus du sol, de façon que l'air pût entourer le câble de toutes parts. Le conducteur en cuivre fut relié à une source à courant continu, et les températures furent déterminées d'après l'accroissement de résistance électrique du cuivre et du plomb. Pour ces deux mesures, on employait le pont double. Les coefficients de température devant être exactement connus, on détermina celui du plomb employé qui avait pour valeur $\alpha = 0{,}004$, rapportée à 15°, avec une exactitude d'environ 0,5 °/₀₀. On calculait $\sigma_{k\tau}$ au moyen de la formule :

$$\sigma_{k\tau} = C \frac{Q\tau}{\rho_\tau J^2 \log(D_{is}/D_i)} \qquad (2)$$

où

$$C = \frac{2\pi \cdot 10^2}{2{,}303} = 272{,}8.$$

D_{is} = diamètre extérieur de l'isolant.
D_i = diamètre extérieur du conducteur.

La mesure fut faite chaque fois pendant 3 à 4 heures. L'état stationnaire était atteint au bout de 2 heures environ. Les observations et les résultats sont donnés par le tableau I.

TABLEAU I

	J en Amp.	TEMPÉRATURE de la salle t_Z	TEMPÉRATURE du cuivre t_{Cu}	TEMPÉRATURE du plomb t_{Pb}	$\tau = t_{Cu} - t_{Pb}$	ρ_τ mesuré.	$\sigma_{k\tau}$	VALEUR MOYENNE $\sigma_{k\tau}$
$Q = 10{,}0$	60	19,6	37,11	32,29	4,82	0,0178	632	
$D_{is} = 7{,}6$	70	17,8	41,23	34,74	6,49	0,018	619	
$D_i = 3{,}6$	80	18,2	49,54	40,60	8,94	0,0186	630	617
	90	17,6	57,15	46,08	11,07	0,0191	603	
	90	17,0	59,48	48,26	11,22	0,0193	603	
$Q = 35{,}0$	130	17,0	34,7	30,2	4,5	0,0178	646	
$D_{is} = 12{,}7$	150	20,4	43,4	37,2	6,2	0,0184	649	621
$D_i = 7{,}56$	180	13,8	46,4	38,5	7,9	0,0186	557	
$Q = 95{,}0$	300	19,9	46,7	41,2	5,5	0,0189	698	
$D_{is} = 16{,}0$	350	17,9	55,9	47,65	8,25	0,0194	750	702
$D_i = 12{,}6$	400	16,2	64,89	55,13	9,76	0,020	657	
$Q = 150{,}0$								
$D_{is} = 21{,}0$	350	18,35	42,55	37,65	4,9	0,0181	761	775
$D_i = 16{,}0$	400	18,2	51,1	44,1	7,0	0,0191	788	
$Q = 210{,}0$	390	20,2	39,5	34,3	5,2	0,0180	905	
$D_{is} = 25{,}0$	450	22,2	48,1	41,1	7,0	0,0183	902	893
$D_i = 19{,}0$	510	20,2	50,7	41,8	8,9	0,0187	872	
$Q = 310{,}0$	500	16,4	34,4	28,05	6,35	0,0176	722	
$D_{is} = 33{,}5$	600	18,6	43,4	34,1	9,3	0,0182	709	721
$D_i = 22{,}75$	700	20,2	56,6	43,0	13,6	0,0189	733	
$Q = 400{,}0$	600	14,5	30,5	25,5	5,0	0,0177	823	
$D_{is} = 33{,}0$	700	15,65	39,85	33,65	6,2	0,0183	725	753
$D_i = 26{,}0$	800	16,0	47,8	39,6	8,2	0,0189	712	

Les auteurs mesurèrent aussi la température de l'enveloppe de plomb par une autre méthode, en plaçant le câble de 10 millimètres carrés de section et de 30 mètres de longueur dans un récipient de 15 mètres cubes rempli d'eau, et dans lequel l'eau circulait à raison de 8 mètres cubes à l'heure. Au bout de 20 minutes, l'état stationnaire était atteint : les résultats de mesure sont indiqués par le tableau II.

TABLEAU II

	J en Amp.	TEMPÉRATURE du cuivre t_{Cu}	TEMPÉRATURE de l'eau t_{Pb}	$\tau = t_{Cu} - t_{Pb}$	ρ_τ	$\sigma_{k\tau}$	VALEUR MOYENNE $\sigma_{k\tau}$
	75	16,76	9,25	7,51	0,0165	679	
$Q = 10{,}0$	100	18,9	7,7	11,2	0,0167	566	
$D_{is} = 7{,}6$	125	30,22	9,4	20,82	0,0174	643	637
$D_i = 3{,}6$	150	40,57	9,4	31,17	0,0181	641	
	175	53,87	9,4	44,7	0,0189	649	
	200	71,14	9,4	61,74	0,0201	646	

On voit, d'après les chiffres du deuxième tableau, que la détermination de la température d'après la résistance électrique de l'enveloppe de plomb donne des résultats exacts. Dans le tableau I, la valeur moyenne de $\sigma_{k\tau}$ est 617, et dans le tableau II, elle est de 637, chiffres suffisamment concordants.

Si l'on compare les valeurs de $\sigma_{k\tau}$ entre elles, constatées sur un même câble pour différentes températures, on constate que la résistance calorifique spécifique est pratiquement indépendante de la température de l'isolant. Ce fait est nettement mis en évidence par les chiffres du tableau II relatif à des expériences dans lesquelles la température a varié entre de larges limites. On aurait pu supposer peut-être que la résistance calorifique variait comme la résistance électrique : il n'en est rien.

Dans la dernière colonne des deux tableaux sont indiquées les valeurs moyennes des différents résultats trouvés. En comparant entre elles les valeurs ainsi données dans le tableau I, on constate une différence surprenante entre les premières et les dernières valeurs. Cette différence est si considérable que l'on est conduit à supposer que l'isolant n'était pas le même. En fait, il s'agissait de câbles appartenant à deux périodes de fabrication différentes. L'enveloppe de plomb

n'était pas la même, surtout pour le câble de 210 millimètres carrés. Evidemment, pour obtenir des valeurs moyennes, il faut ne prendre que des câbles de même constitution et de même fabrication. Il en est ainsi des câbles de 10, 35 et 95 millimètres carrés. La valeur moyenne est 644, soit, en chiffres ronds, 650 pour $\sigma_{k\tau}$.

Expériences sur le revêtement. — La résistance calorifique spécifique du revêtement fut étudié de la façon suivante. Un câble normal à armure de fer fut placé dans la salle d'expériences sur des rouleaux de porcelaine et son enveloppe de plomb fut échauffée par le passage d'un courant continu. L'augmentation de température était mesurée par l'augmentation de résistance électrique. La température à la surface du câble fut déterminée par la variation de résistance d'un fil de cuivre enroulé sur le câble. On tenait compte de la présence de l'armure de fer en faisant une réduction sur la valeur du diamètre extérieur. La détermination de la section du conducteur fut faite au moyen de la formule $L/R_\tau = Q/\rho_\tau$, L étant la longueur de l'enveloppe de plomb en mètres et R_τ sa résistance en ohms. Les dimensions du câble en millimètres étaient les suivantes :

Diam. ext^r de l'enveloppe de plomb. $D_{Pb} = 23,2$
— du revêtement intérieur. $D_{Pi} = 27,2$
— de l'armure en fer. . . $D_{Fe} = 29,2$
— du câble. . . . . . . $D_a = 33$

Le diamètre extérieur réduit était alors $D'_a = 30,8$ millimètres.

Les expériences ont donné les résultats qu'indique le tableau III.

TABLEAU III

J	t_{Pb}	t_a	τ	$\sigma_{k\tau}$
90,2	40,6	36,4	4,2	561
130,5	60,3	49,8	10,5	590
182,4	103,8	81,0	22,8	566

L'hypothèse que le revêtement du câble enterré variait fortement au point de vue de sa résistance calorifique par suite de la présence d'humidité conduisit les auteurs à faire une expérience avec le câble enterré dans un sol arrosé. Les résultats sont résumés par le tableau IV.

TABLEAU IV

J	t_{Pb}	t_a	τ	$\sigma_{k\tau}$	
126,8	24,9	15,5	9,4	634	Au bout de 2 jours
127,4	25,0	15,5	9,5	636	— 4 —

Contrairement à l'attente des auteurs, la valeur de $\sigma_{k\tau}$ présente une augmentation. Ce fait est peut-être dû à l'abaissement de la température. On voit qu'il ne peut être question d'un coefficient de température, car toutes les températures du tableau III sont voisines des points de fusion de l'imprégnant, tandis que celles du tableau IV sont beaucoup plus basses. En ce qui concerne la comparaison que l'on peut être amené à effectuer avec l'isolant du câble, il ne faut pas perdre de vue que ce dernier est toujours soumis à la pression de l'enveloppe de plomb, tandis que le revêtement extérieur n'est soumis à aucune pression et que le revêtement intérieur n'est soumis qu'à la faible pression de l'armure de fer. La valeur moyenne de cinq mesures est 599 : on peut donc prendre en chiffres ronds 600 comme valeur de $\sigma_{k\tau}$.

De ces mesures, on peut tirer la conclusion générale que les valeurs de la résistance calorifique spécifique du revêtement concordent suffisamment avec celles de l'isolant pour qu'il ne soit plus nécessaire de faire une distinction dans les calculs.

Mesures des résistances de passage. — On pouvait se demander s'il n'existait pas de résistance de passage à la surface de séparation de deux matières distinctes. Pour cela, les auteurs ont fait l'expérience suivante. Deux câbles de $19^{mmq},5$ de section de cuivre et 4 millimètres d'isolant constitué par du papier imprégné avec enveloppe de plomb furent fabriqués de la même manière. La seule différence entre les deux était que la couche isolante de l'un d'eux était partagée en deux couches par une mince feuille d'étain. Entre le conducteur en cuivre et l'enveloppe de plomb, il n'y avait donc que deux résistances de passage dans l'un des câbles et quatre dans l'autre. Les diamètres étaient $D_i = 4,98$ et $D_{is} = 12,98$.

Les résultats des mesures sont indiqués par le tableau V.

TABLEAU V

	J	t_{Cu}	t_{Pb}	τ	ρ_τ	$\sigma_{k\tau}$
1° Sans feuille d'étain.	100	42,3	32,2	10,1	0,0184	701
	150	78,5	53,6	24,9	0,0209	676
2° Avcc feuille d'étain.	100	42,8	32,5	10,3	0,0185	709
	150	29,4	54,3	25,1	0.0209	682

La différence entre les valeurs de σ est si faible que l'on ne doit tenir compte d'aucune résistance de passage.

Expériences sur des câbles à trois conducteurs torsadés à basse tension. — Dans les câbles à un seul conducteur, l'isolant présente la meilleure forme possible pour la détermination des constantes des matériaux employés. Dans les câbles à trois conducteurs torsadés, il en est autrement, et l'on peut se demander si la théorie de Mie[1], qui suppose un milieu homogène, est suffisamment exacte. Les auteurs se sont donc proposés d'étudier la valeur de σ_k pour des câbles de différentes sections mais de même nature (tension, isolant, etc.) pour voir si cette valeur est bien constante. Les résultats expérimentaux obtenus par l'un des auteurs permettant le calcul de cette grandeur, il a été inutile de faire de nouvelles expériences. Le tableau VI résume les résultats ainsi obtenus.

TABLEAU VI

	J en Amp.	$\tau = t_{Cu} - t_{Pb}$	ρ_τ	$\sigma_{k\tau}$	VALEUR MOYENNE DE $\sigma_{k\tau}$
$Q = 3 \times 25$	3×100	7,35	0,0169	588	
$D_{is} = 22$	125	11,75	0,0175	581	581
$D_i = 14,28$	150	17,5	0,0183	575	
$Q = 3 \times 35$	3×100	4,8	0,0165	605	
$D_{is} = 23,6$	130	8,25	0,0171	595	589
$D'_i = 16,6$	150	11,25	0,0176	590	
	180	16,3	0,σ184	566	
$Q = 3 \times 50$	3×150	6,45	0,0169	560	
$D_{is} = 27,1$	180	9,0	0,0174	526	548
$D'_i = 19,72$	210	13,5	0,0180	560	
$Q = 3 \times 95$	3×200	6,0	0,0168	665	
$D_{is} = 34,6$	250	8,85	0,0173	610	622
$D'_i = 26,48$	300	12,95	0,0181	592	
$Q = 3 \times 150$	3×250	4,8	0,0166	608	
$D_{is} = 41,5$	300	7,6	0,0170	650	624
$D'_i = 32,68$	350	10,0	0,0175	612	
	400	13,8	0,0181	625	
$Q = 3 \times 240$	3×320	5,75	0,0166	768	
$D_{is} = 51,4$	400	8,9	0,0171	739	731
$D^i = 41,16$	480	12,3	0,0177	687	

(1) *Eclairage Électrique*, tome XLIII, 24 juin 1905, p. 469.

Le dernier câble doit être mis à part car il est d'une fabrication différente plus récente. Les valeurs relatives aux autres câbles concordent bien entre elles : leur moyenne est environ 593 : on peut donc prendre en chiffres ronds la valeur 600 pour $\sigma_{k\tau}$ dans les câbles à trois conducteurs torsadés à basse tension du genre étudié. Vis-à-vis du chiffre 650 trouvé pour le câble à un conducteur, on voit que la constante $\sigma_{k\tau}$ subit une diminution de 10 °/₀ environ.

(A suivre.) R. V.

ÉCLAIRAGE

Sur le facteur de réduction sphérique des lamves au tantale. — **C.-H. Sharp.** — *Electrical World*, 16 juin 1906.

Lorsqu'on établit un nouveau type de lampes, tel que les lampes Nernst ou les lampes au tantale, une question se pose immédiatement, celle de savoir si les méthodes de mesure ordinairement employées s'appliquent au nouveau type adopté. On sait, par exemple, que la valeur d'une lampe Nernst au point de vue de l'éclairage ne peut pas être déterminée d'une façon convenable par une mesure de l'intensité lumineuse dans une direction horizontale, comme l'on fait pour les lampes à incandescence ordinaires, mais que l'on doit recourir à la détermination plus compliquée de l'intensité moyenne sphérique ou hémisphérique. Dans le cas de la lampe au tantale, il n'est pas évident que la mesure de l'intensité horizontale moyenne et la détermination du facteur de réduction horizontal (rapport de l'intensité moyenne sphérique à l'intensité moyenne horizontale) soient suffisantes. Dans le cas de la lampe à filament de carbone, cette méthode est suffisante, car on a établi que le facteur de réduction sphérique était le même pour toutes les lampes d'un type donné. En passant d'un type à l'autre, on doit tenir compte de la différence qui existe entre les valeurs du fac-

teur de réduction sphérique. C'est plus important que l'on ne se l'imagine généralement.

Si, par exemple, on fait une comparaison entre la durée utile des lampes à filament de carbone ayant un facteur de réduction sphérique de 0,82 et la durée réelle des lampes à filament de carbone ayant un facteur de réduction de 0,80 donnant la même intensité lumineuse horizontale pour un même nombre de watts, on constate que les lampes ayant le plus faible facteur de réduction présentent une durée utile de 10 % plus considérable environ que celles possédant le plus grand facteur de réduction. Cela se conçoit facilement, puisque la lampe ayant le plus faible facteur de réduction donne un flux total plus faible: la consommation en watts par bougie moyenne sphérique est donc plus élevée et le rendement plus faible. Si la lampe avait le même rendement moyen sphérique que l'autre, elle produirait une intensité lumineuse horizontale plus considérable.

La théorie indique que le facteur de réduction sphérique d'un filament consistant en un fil droit, noir, non lustré est égal à 0,785 : le facteur de la lampe au tantale doit donc être plutôt inférieur que supérieur à ce chiffre, puisque la surface est métallique, polie et brillante quand la lampe est neuve. Tous les résultats publiés sur les lampes au tantale sont basés sur les valeurs de l'intensité lumineuse horizontale et l'on ne s'est pas préoccupé de savoir si cette façon de faire, admissible pour la lampe à filament de carbone, l'était encore pour la nouvelle lampe. Des valeurs du facteur de réduction ont été publiées par Kennely et Whiting (1) en 1905 et ces valeurs, inférieures à 0,785, diffèrent considérablement entre elles.

Dans un grand nombre d'expériences faites sur des lampes au tantale, on a trouvé que le facteur de réduction sphérique n'est pas constant, mais varie beaucoup d'une lampe à l'autre. Les différences sont si fortes que l'on ne peut pas établir de valeur moyenne utilisable pour le facteur de réduction de ces lampes. Il en résulte que la valeur de l'intensité sphérique moyenne d'une lampe au tantale ne peut pas être déduite exactement de l'intensité horizontale moyenne mesurée multipliée par un facteur de réduction, comme c'est le cas pour les lampes au carbone : l'intensité lumineuse sphérique moyenne doit être mesurée dans chaque cas particulier.

(1) *Éclairage Électrique*, tome XLIV, 26 août 1905, p. 310.

L'auteur a constaté, au cours d'expériences sur la durée de fonctionnement des lampes au tantale, que le facteur de réduction sphérique atteint des valeurs de plus en plus élevées à mesure que la lampe vieillit. Les chiffres qui suivent donnent une idée de cette variation :

FACTEUR DE RÉDUCTION SPHÉRIQUE
DE LAMPES AU TANTALE

NEUVES	VIEILLES	MODIFICATION
0,764	0,856	12 %
0,715	0,878	23
0,760	0,886	16,5
0,738	0,938	27
0,726	0,888	22
0,688	0,864	25,5
0,716	0,909	27
0,742	0,924	24,5
0,707	0,902	27,5
0,711	0,925	30
Moyenne 0,726	0,897	23,5

On voit que la variation est très considérable et atteint quelquefois 30 % de la valeur initiale du facteur de réduction. Cela indique que la proportion de la lumière totale émise dans le plan horizontal devient de plus en plus faible. La diminution de l'intensité lumineuse avec l'âge de la lampe, indiquée par une mesure de l'intensité lumineuse horizontale, est donc exagérée. En fait, les mesures faites sur l'intensité moyenne sphérique ont montré que la quantité de lumière produite est plus considérable vers la fin de la vie de la lampe qu'au commencement du fonctionnement de celle-ci. Cet effet est augmenté par les court-circuits qui se produisent entre portions voisines du filament et qui ont pour effet de raccourcir la longueur totale du filament, dont la température devient ainsi plus élevée. Dans tous les cas, la conclusion de ces expériences est que les essais de lampes au tantale doivent porter sur l'intensité moyenne sphérique.

Évidemment, cette modification du facteur de réduction sphérique doit être accompagnée d'une modification dans la distribution de l'intensité lumineuse dans un plan vertical. Il en est bien

ainsi, comme on peut s'en rendre compte par la comparaison de deux courbes relevées l'une avec une lampe neuve et l'autre avec une lampe usagée.

Une des raisons de cette particularité réside dans le dépôt noir qui se forme sur l'ampoule dans la zone qui correspond à l'emplacement des zigzags circulaires du filament. L'effet de ce dépôt dans la zone médiane est de diminuer l'intensité horizontale beaucoup plus que l'intensité lumineuse dans les autres directions et de changer ainsi la distribution de l'intensité lumineuse, en modifiant la valeur du facteur de réduction sphérique. Une autre raison est la modification de la surface du filament avec l'usage. Le filament neuf a l'apparence d'un fil d'acier poli, tandis que le filament usagé devient irrégulier et granuleux : son pouvoir réfléchissant change considérablement, et il en résulte une modification du facteur de réduction. Il serait intéressant, pour déterminer la part qui revient à chaque cause, d'établir des lampes au tantale à large ampoule, de forme sphérique de préférence. Si la distance entre le filament et le verre était supérieure à la longueur de libre parcours moyenne des particules de tantale expulsées, le noircissement diminuerait sans doute ou se répartirait uniformément sur la surface.

L'auteur termine en indiquant que les mesures photométriques relatives aux lampes au tantale ne doivent pas être effectuées comme les mesures relatives aux lampes à filament de carbone.

R. R.

Sur l'éclairement produit par deux sources lumineuses. — **Benton.** — *Elektrotechnik und Maschinenbau*, 24 juin 1906.

Soient A et B deux sources lumineuses de même intensité J supposées ponctiformes. L'éclairement maximum en un point C défini par le rayon r, qui le joint au milieu de la ligne AB reliant les deux sources lumineuses et par l'angle φ fait par ce rayon avec la ligne de jonction AB, est donné par la formule

$$e_{\max} = J\sqrt{\frac{1}{(D^2 + r^2 - 2rD\cos\varphi)^2} + \frac{1}{(D^2 + r^2 + 2rD\cos\varphi)^2} + \frac{2(r^2 - D^2)}{[D^4 + r^4 + 2r^2D^2(1 - 2\cos^2\varphi)]^{3/2}}},$$

2D étant la distance entre les deux sources lumineuses.

L'auteur publie un tableau donnant les valeurs du radical en fonction de r/D et de φ. L'emploi de ce tableau est montré par les deux exemples suivants :

1° Deux sources lumineuses de 50 bougies sont placées à 3 mètres l'une de l'autre. Quel est l'éclairement en un point C placé à 2 mètres au-dessous du milieu de la ligne de jonction ? On a $\varphi = 90°$; $r/D = 1,33$; valeur du radical d'après le tableau, 0,258. On en déduit que l'éclairement est de 13 bougies par mètre carré.

2° Un espace de 12 mètres de longueur et 6^m,80 de largeur doit être éclairé par deux lustres situés à 3 mètres de hauteur et à 4 mètres l'un de l'autre. On doit pouvoir lire dans un coin de la pièce. Quelle intensité lumineuse doit avoir chaque lustre ? L'éclairement nécessaire pour pouvoir lire est de 4 bougies par mètre carré. Le livre étant à 1 mètre du sol, on a $r = 7^m,2$; $\varphi = 33°5$; $r/D = 3,6$; J = 84 bougies.

En traçant, au moyen de la formule précédente, la répartition de la lumière, on peut trouver à quelle distance de sources lumineuses l'éclairement est uniforme. Par exemple, si dans le second cas on pose comme condition que l'éclairement dans les coins soit égal à l'éclairement au point milieu des murs placé vis-à-vis du milieu de la ligne de jonction, on trouve que pour $e = 4$, $D = 7^m,2$, on doit avoir J = 74 bougies. Un seul lustre placé au milieu devrait avoir une intensité lumineuse de 207 bougies ; on économise donc 23 °/₀ en employant deux lustres.

E. B.

Influence de la courbe de tension sur les lampes à arc. — **C. Zorawski.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 28 juin 1906.

Dans une installation urbaine étendue à courants triphasés, toutes les lampes à arc établies chez des particuliers durent être remplacées par des lampes à incandescence à cause du bruit qu'elles produisaient en fonctionnement. Des expériences détaillées et complètes montrèrent que la cause de ce phénomène était due à la forme de la courbe de tension produite par les générateurs de l'usine centrale. Il est à noter que l'emploi de bobines de self-induction en série avec les lampes était interdit par la Société exploitante, et que l'emploi de rhéostats ohmiques était seul autorisé. Les générateurs de l'usine centrale sont

des machines à pôles intérieurs et à induit fixe muni de deux encoches par pôle et par phase. Ces encoches sont ouvertes, et présentent une valeur très défavorable pour le rapport de l'ouverture des encoches à la grandeur de l'entrefer (18/4 à 5). Les courbes relevées à l'ondographe Hospitalier ont montré que la forme de la courbe de tension est très irrégulière et contient un grand nombre d'harmoniques assez peu élevés qui produisent dans la courbe des dents très marquées. Une expérience faite en remplaçant les résistances ohmiques en série avec les lampes par des bobines de self-induction a donné le résultat prévu, les bobines de self uniformisant la courbe de tension : avec des bobines assez fortes, on a obtenu une marche satisfaisante des lampes à arc.

En résumé, on voit que la forme de la courbe de tension présente une grande importance pour le fonctionnement des lampes à arc. Les meilleurs résultats seraient obtenus avec une forme de courbe aplatie, forme inadmissible dans un réseau à cause des pertes dans le fer des transformateurs. Il y a donc lieu de se rapprocher autant que possible de la forme sinusoïdale, qui doit être la plus satisfaisante pour les installations de lumière et de force motrice. E. B.

ÉLÉMENTS PRIMAIRES & ACCUMULATEURS

Brevets récents concernant les accumulateurs alcalins. — *Centralblatt für Accumulatoren*, avril, mai, juin 1906.

Perfectionnement à la fabrication des plaques. — F. E. Polzeniusz et R. B. Goldschmidt. — Brevet anglais 778 du 14 janvier 1905, acc. 14. 2. 06.

On a préparé des plaques par un dépôt de zinc sur des supports en cuivre recouverts précédemment de mercure. On a proposé de même, pour obtenir électrolytiquement une couche poreuse de nickel, de faire un dépôt avec des solutions contenant aussi du fer, du zinc et d'autres métaux et de faire disparaître ensuite ceux-ci, de façon que le nickel reste seul. L'inventeur dépose directement sur un support approprié en métal conducteur une couche mince poreuse métallique sans l'emploi de mercure ni d'aucun autre métal auxiliaire. Comme électrolyte pour la préparation du dépôt poreux, on peut employer des fluorures. L'anode est formée par une plaque du métal à déposer et la cathode par un réseau de fils métalliques.

Plaque d'accumulateur. — Th. A. Edison. — Brevet anglais 19 025 du 25 janvier 1906, acc. 22. 3. 06.

Si l'on mélange avec la matière active positive des flocons de graphite, il se produit, au bout d'un certain temps d'électrolyse, une modification de la résistance de contact, de sorte qu'après un certain temps, la capacité de l'élément diminue. On a proposé aussi de recouvrir les fragments de graphite d'une mince couche de métal indifférent par rapport à l'électrolyte. Si l'on emploie du nickel en flocons et en petites feuilles, il est très difficile, dans les solutions alcalines, d'assurer un bon contact sans employer une très forte pression de contact. Ce phénomène peut être dû à la formation d'une pellicule d'oxyde non conductrice invisible et extrêmement mince. Le cobalt métallique ne présente pas cet inconvénient. L'inventeur emploie alors un alliage de 60 °/₀ de cobalt et 40 °/₀ de nickel qui, au moment de l'attaque, ne présente pas de foisonnement nuisible. Les proportions des deux métaux peuvent être variées dans de larges limites. On mélange, par exemple, deux parties de cet alliage avec huit parties d'hydroxyde de nickel employées sous forme de grains recouverts d'un liant tel que la mélasse, par exemple. Le mélange est pressé dans des pochettes, puis débarrassé du liant par un lavage ; il est avantageux de rendre l'eau légèrement alcaline.

Matière active pour accumulateurs. — Th. A. Edison. — Brevet anglais 1927, 25 janvier 1906, acc. 29. 3. 06.

L'invention vise la préparation d'une électrode pour accumulateurs alcalins. On broie de l'hydroxyde de nickel en fragments très fins que l'on mélange avec une substance liante telle que la mélasse, puis on ajoute à ce mélange du graphite et on lave pour éliminer le liant : ce lavage doit être très prolongé et plusieurs fois renouvelé.

Mode de traitement des accumulateurs alcalins. — Th. A. Edison. — Brevet américain 817 162 du 29 septembre 1904, acc. 10. 4. 06.

Les éléments nickel-fer perdent souvent de la capacité quand on les laisse partiellement chargés après avoir enlevé l'électrolyte à cause de l'échauffement des plaques négatives. Pour éviter cet inconvénient, on les charge en sens inverse avant d'enlever l'électrolyte.

Électrodes positives et négatives pour accumulateurs alcalins. — Ch. Humbert. — Brevet français 359 732, 23. 11. 1905.

Les électrodes doivent avoir une grande sur-

face active et un faible poids mort, ainsi qu'un faible encombrement. Pour les plaques positives, on perce dans une tôle mince en nickel des trous qui donnent à l'extérieur de cette tôle l'apparence d'une rape, puis on la découpe en bandes dont la largeur est égale à l'épaisseur à donner à la plaque et on superpose ces bandes verticalement les unes au-dessus des autres. Le tout est maintenu par des tiges de nickel passant dans des trous ménagés à cet effet.

Procédé pour oxyder et former les plaques positives en nickel des accumulateurs alcalins. — P. Gouin. — Brevet français 360 664, 4 mars 1905.

Quand on place dans des pochettes des oxydes mélangés de corps conducteurs, le courant allant de l'extérieur vers l'intérieur ne peut pas traverser la totalité de la masse et présente une répartition inégale. D'autre part, il se produit sur la pochette une forte électrolyse inutile qui entraîne une perte d'énergie importante. Les corps inactifs ajoutés à l'oxyde ne résistent pas longtemps à l'électrolyse et produisent des actions locales nuisibles. Leur poids mort, ajouté à celui des pochettes et du cadre, est relativement important par rapport au poids de la matière active. Si, d'autre part, on oxyde du nickel métallique par échauffement en présence de corps oxygénés, la surface est poreuse et craquelée. On doit donc ménager une âme métallique assez importante, ce qui augmente le poids mort. Pour éviter ces différents inconvénients, on place sur une plaque de nickel une couche mince d'azotate de nickel ou d'un sel double d'azotate de nickel dissous dans l'eau, et on chauffe à 500 ou 600°. Il se forme ainsi une couche mince très adhérente de Ni^2O^3. On place alors la plaque comme anode dans un bain alcalin dans lequel le nickel est insoluble, afin de transformer l'oxyde Ni^2O^3 en un oxyde supérieur. Cette formation a lieu avec une densité de courant relativement élevée (1 à 2 ampères décimètre carré de surface) et sous une différence de potentiel de 2,5 à 5 volts : elle dure 100 à 300 heures suivant l'épaisseur de la couche d'oxyde. Cette méthode offre les avantages suivants : le courant, allant du milieu de la plaque vers l'extérieur, doit traverser toute la couche d'oxyde ; la résistance intérieure est très faible par suite de la possibilité que l'on a de donner aux plaques une grande surface active ; l'adhérence de l'oxyde est extrêmement bonne ; la durée des électrodes est très longue et sa capacité ne s'abaisse pas ; le poids mort est faible par rapport au poids de matière active.

E. B.

MESURES

Appareils de mesure enregistreurs. — *Elektrotechnik und Maschinenbau*, 24 juin 1906.

La Compagnie Westinghouse a établi une série d'appareils enregistreurs (ampèremètres, voltmètres, wattmètres, cos φ-mètres, fréquencemètres) dans lesquels l'enregistrement est effectué en coordonnées rectangulaires par l'intermédiaire d'un relais.

La figure 1 représente un voltmètre enregistreur. Le courant passe par la résistance V dans

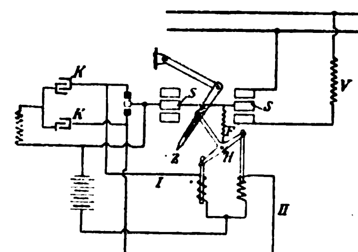


Fig. 1. — Voltmètre enregistreur.

le voltmètre, établi sur le principe de la balance électrodynamique de Lord Kelvin. Les mouvements des bobines S de l'appareil ferment le circuit I ou II du relais et actionnent les solénoïdes I ou II. Les condensateurs K ont pour but de diminuer les étincelles aux contacts. Les noyaux des solénoïdes sont reliés, par un guidage rectiligne, à l'aiguille Z de l'enregistreur. Quand le solénoïde II est excité, l'aiguille Z se déplace vers la droite ; quand le solénoïde I est excité, elle se déplace en sens inverse. Le rappel au zéro est assuré par un ressort F qui relie le levier H avec l'équipage mobile de l'appareil. L'avantage de ce dispositif est que le frottement de la plume n'altère pas la sensibilité de l'appareil de mesure. Cette plume possède un réservoir d'encre suffisant pour deux mois de fonctionnement et elle est assez lourde. La vitesse de déroulement du papier est réglable ; elle est habituellement de 5 centimètres par heure. La vitesse du déplacement de la plume est réglable par réglage de l'amortisseur à air et la sensibilité est réglable par réglage de la distance des contacts.

E. B.

CHARTRES. — IMPRIMERIE DURAND, RUE FULBERT.

Le Gérant : J.-B. Nouet.

Tome XLVIII. Samedi 4 Août 1906. 13e Année. — N° 31.

L'Éclairage Électrique

REVUE HEBDOMADAIRE DES TRANSFORMATIONS

Electriques — Mécaniques — Thermiques

DE

L'ÉNERGIE

MÉTHODE DE CALCUL DES MOTEURS A RÉPULSION

Quoique d'une part, l'on ait rarement à construire des moteurs fixes à répulsion destinés à êtrebranchés sur des circuits de lumière, et quoique d'autre part le moteur à répulsion ne se soit guère répandu pour la traction, il est pourtant intéressant de faire connaître une méthode de calcul de ce genre de machines, résultat de recherches entreprises par l'auteur, il y a environ deux ans(1). Cette méthode est basée sur l'adaptation du diagramme de cercle au moteur à répulsion, et rend l'étude d'un moteur à répulsion très analogue à celle d'un moteur d'induction, et d'une simplicité tout aussi grande.

On commencera par établir le diagramme correspondant à un courant primaire constant, lorsqu'on fait varier le calage des balais, la vitesse restant constante et égale au synchronisme.

Le courant primaire constant sera représenté par un vecteur horizontal OI′ (fig. 1). On admettra que le courant du stator et le courant du rotor engendrent deux flux respectivement proportionnels aux courants qui les produisent et en phase avec eux, la résultante de ces deux flux constituant le flux résultant.

Soit : N, la fréquence, en périodes par seconde ;
M, le coefficient d'induction mutuelle du stator et du rotor ;
ν, le facteur de dispersion propre au stator ;
ν_1, le facteur de dispersion propre au rotor ;
θ, l'angle de calage des balais (angle entre l'axe du stator et celui du rotor).

(1) Voir *Electrical Review*, 5 et 19 février, 4 mars 1904. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, vol. XXXIII, ce dernier article traduit dans l'*Eclairage Electrique*, du 25 mars 1905.

Il est clair qu'alors $M\nu$ représente le coefficient de self-induction du stator, $M\nu_1$ le coefficient de self-induction du rotor.

Le flux produit par le courant primaire engendre dans l'enroulement du stator une force électromotrice de self-induction

$$OE = 2\pi . n . M\nu \, 10^{-8} I'$$

en arrière de 90° sur ce courant (voir fig. 1). Le même flux induit dans l'enroulement du rotor deux forces électromotrices, l'une statique, $OA = \frac{OE \cos\theta}{\nu}$, en phase avec OE, l'autre dynamique $OB = \frac{OE \sin\theta}{\nu}$ due à la rotation du rotor à la vitesse du synchronisme dans le champ du stator. Il est clair que la résultante OE de ces deux forces électromotrices, c'est-à-dire la force électromotrice totale induite dans le rotor par le courant du stator, est constante en grandeur, égale à $\frac{OE}{\nu}$, et qu'elle fait avec OE l'angle θ.

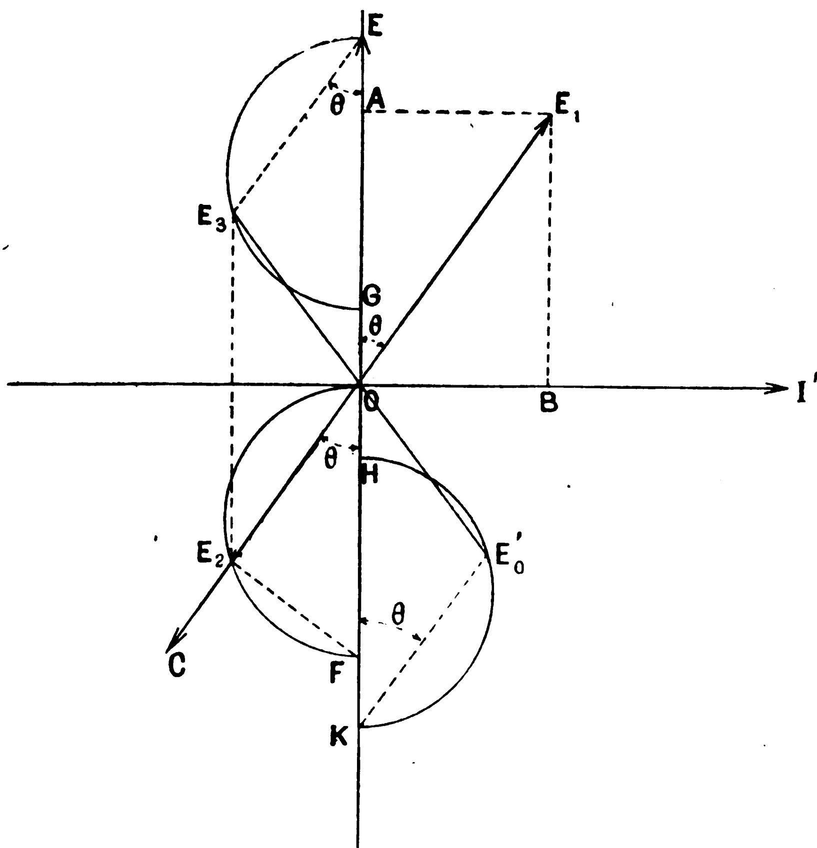


Fig. 1.

La force électromotrice OE est tenue en équilibre par la force électromotrice de self-induction OC, produite par le courant secondaire, et égale à $2\pi n . M\nu_1 . 10^{-8} I_2$. Le courant secondaire induit aussi une force électromotrice

$$OE_2 = 2\pi n M . I \cos\theta = \frac{OE}{\nu\nu_1} \cos\theta,$$

dans le stator.

On voit facilement que cette force électromotrice OE_2 peut s'obtenir par la projection sur OC d'un vecteur $OF = \frac{OE}{\nu\nu_1}$ opposé en phase à OE. L'angle OE_2F étant un angle droit, le lieu du point E_2, quand θ varie, est une demi-circonférence décrite sur OF comme diamètre. La force électromotrice totale engendrée dans le stator par les courants du stator et du rotor, est la résultante OE_3 de OE et OE_2. On voit ainsi que le lieu de E_3 est une circonférence décrite sur EG comme diamètre, la longueur OG étant égale à $OE - \frac{OE}{\nu\nu_1} = OE\left(1 - \frac{1}{\nu\nu_1}\right) = \sigma . OE$, où σ représente le coefficient de dispersion.

La tension appliquée aux bornes OE'_0 doit être égale et opposée à OE_3; le point E'_0 se déplace donc sur la circonférence HKE'_0; en d'autres termes, le courant étant constant, le lieu des extrémités des vecteurs représentant la tension appliquée est, pour la vitesse du synchronisme, une circonférence, lorsqu'on fait varier l'angle θ de calage des balais.

Dans ce diagramme, OH représente évidemment la tension correspondant au moteur en

court-circuit, les balais étant directement sous le pôle ($\theta = 0$); OK est la tension correspondant au circuit secondaire ouvert ($\theta = 90°$); il s'ensuit que $OH / OK = \sigma$.

De ce que le lieu des extrémités des vecteurs représentant la tension aux bornes, à courant constant, est une circonférence, on déduit facilement que, si la tension aux bornes OE_0 est constante, l'extrémité du vecteur OI se déplace sur une circonférence, lorsque l'angle θ de calage des balais varie.

Soit OI′ l'intensité constante du courant, dans la figure 1, OI l'intensité variable du même

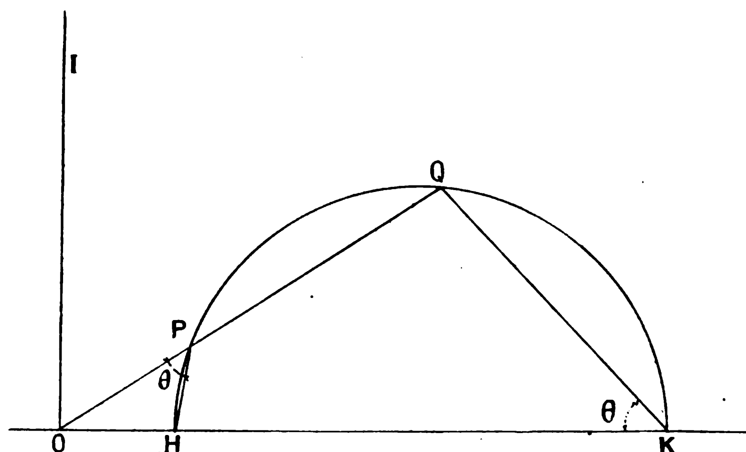


Fig. 2.

courant dans la figure 2, OE_0 la valeur constante de la tension aux bornes dans la figure 1, OE'_0 la valeur variable de la même tension ; on a :

$$OI = \frac{OI'}{OE'_0} \cdot OE_0.$$

Le quadrilatère PHQK étant inscriptible, la somme des angles OKQ + HPQ est égale à deux droits, donc égale aussi à la somme HPQ + OPH; retranchant des deux parts l'angle commun HPQ, il reste

$$OPH = OKQ = \theta.$$

Dans ce diagramme, OP représentant le courant primaire, HP est égal au courant secondaire $\times \cos\theta$, et l'angle entre les courants primaire et secondaire est égal à $180 - \theta$. Il est facile de voir que, dans ces conditions, le point H correspond à un minimum du courant absorbé, pour $\theta = 90°$, et le point K à un maximum, pour $\theta = 0$. On peut aussi démontrer que le décalage minimum φ est égal à 2θ, ce qui permet d'appliquer, pour déterminer θ, la formule usuelle pour le calcul du facteur de puissance dans un moteur polyphasé, en fonction de σ.

Comme on a négligé, dans tout ce qui précède, les pertes, on a :

puissance utile = puissance absorbée.

Il s'ensuit que la longueur d'une perpendiculaire abaissée de l'extrémité d'un vecteur du courant sur une perpendiculaire au vecteur de la tension aux bornes, est proportionnelle à la puissance absorbée et à la puissance utile, c'est-à-dire, puisque la vitesse est constante, au couple. Ainsi la construction qui donne le couple dans un moteur polyphasé est aussi applicable dans ce cas, au moyen du diagramme très simple de la figure 3.

On peut, sans grande difficulté, généraliser ce diagramme, de manière à tenir compte des

résistances et des pertes, lorsque la construction simple paraîtra insuffisante ; cette question a été traitée ailleurs en détail(¹) : on se contentera d'y renvoyer le lecteur en indiquant ici les grandes lignes seulement.

On suppose connus le courant de court-circuit OT, et le courant absorbé OB, le secondaire étant ouvert, ainsi que les angles de décalage respectifs.

1° Sur BT comme diamètre, on trace une circonférence (fig. 3), qui représente le lieu des extrémités du vecteur figurant le courant primaire, lorsqu'on fait varier le calage des balais ;

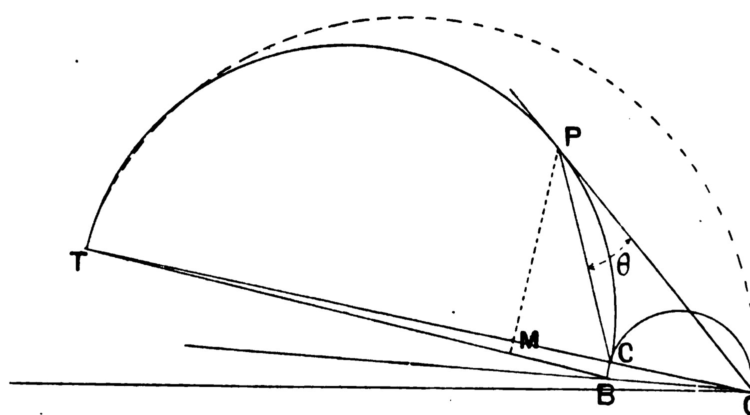


Fig. 3.

2° De l'origine, on mène la tangente à cette circonférence ;

3° On trace deux circonférences, sur OB et OT comme diamètre respectivement. Le cercle correspondant au synchronisme rencontre ces deux circonférences en B et T.

Désignant par $90 - \alpha$ l'angle de décalage entre la tension primaire OE_1 et le courant secondaire, le décalage entre les courants primaire et secondaire est égal à $180 - (\theta + \alpha)$.

Pour obtenir l'angle θ, il faut donc trouver un point C, tel que l'angle CPB, lequel est constant lorsque P décrit l'arc de circonférence, soit égal à α. Or on a $OPC = \theta$; comme on sait que, lorsque $OP = OT$, $\theta = 0$, on en déduit que C est le point d'intersection du vecteur OT avec le cercle du synchronisme.

Le couple est alors représenté par la longueur de la perpendiculaire PM.

Ce diagramme est trop compliqué pour l'usage courant, et ne conduit pas à des formules approchées suffisamment simples ; il était cependant utile de l'indiquer, car il montre d'une façon claire l'influence des pertes sur le fonctionnement du moteur.

La méthode de calcul que l'on va exposer repose sur une combinaison de ce diagramme simple à calage variable, avec le diagramme bien connu du moteur à répulsion, pour un calage donné (fig. 4) ; combinaison qui permet d'établir facilement une série de formules fournissant toutes les grandeurs intéressantes dans le fonctionnement du moteur.

On voit en premier lieu, sur le diagramme de la figure 4, que si P est le point de contact de la tangente issue de O, on a :

$$\cos\varphi = \frac{PR}{OR} = \frac{\frac{1}{2}(OK - OH)}{\frac{1}{2}(OK + OH)} = \frac{1 - \frac{OH}{OK}}{1 + \frac{OH}{OK}} = \frac{1 - \sigma}{1 + \sigma},$$

c'est-à-dire que l'on retrouve la formule habituelle des moteurs polyphasés.

(¹) *Electrical Review*, 4 mars 1904.

On a vu plus haut que $\varphi = 2\theta$; la détermination de $\cos \varphi$ donne donc en même temps celle de θ.

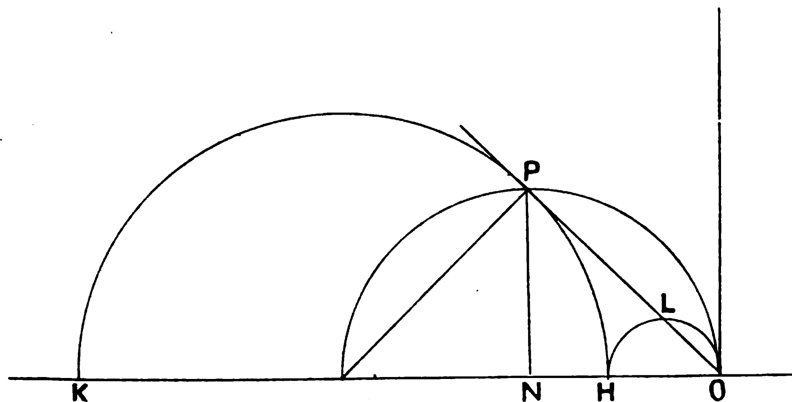


Fig. 4.

On peut ainsi, en admettant la valeur du rendement, déduire le courant de pleine charge à la manière habituelle, puis le courant magnétisant, de la formule :

$$\text{courant magnétisant} = \text{courant de pleine charge} \sqrt{\frac{1}{\sigma}}$$

et le courant de court-circuit de la formule :

$$\text{courant de court-circuit} = \text{courant de pleine charge} \sqrt{\sigma}.$$

Le courant de démarrage est égal à $OR = \frac{OK + OH}{2} = i \frac{1 + \sigma}{2\sqrt{\sigma}}$.

Le couple, à une vitesse quelconque, est, comme on sait, proportionnel au produit OP . PL.

Or on a
$$OL = OH \sin \varphi$$
et
$$\frac{OH}{OR} = \frac{\sqrt{\sigma}}{\frac{1+\sigma}{2\sqrt{\sigma}}} = \frac{2\sigma}{1+\sigma};$$
on en tire :
$$OL = OR \cdot \frac{2\sigma}{1+\sigma} \sin \varphi$$
et, comme $OP = OR \sin \varphi$, on voit que le couple est proportionnel à

$$\overline{OR}^2 \sin^2 \varphi \frac{1-\sigma}{1+\sigma} = \overline{OP}^2 \frac{1-\sigma}{1+\sigma}.$$

Si le diagramme est tracé à une échelle telle que $OR = 1$, on voit que $\overline{OP}^2$ est égal à ON : ON est donc une mesure du couple dans le cas d'un moteur sans pertes.

On connaît aussi la valeur du rapport

$$\frac{\text{couple de démarrage}}{\text{couple normal}} = \frac{\overline{OR}^2}{\overline{OP}^2} = \frac{(1+\sigma)^2}{4\sigma}.$$

On sait enfin que la valeur du rapport de la vitesse réelle à la vitesse du synchronisme est proportionnelle à RP/OP. Comme, au synchronisme, ce rapport est égal à l'unité, on en déduit que

$$\frac{RP}{OP} = \cot \varphi = \frac{1-\sigma}{2\sqrt{\sigma}}.$$

Toutes ces formules combinées permettent de calculer la vitesse, le facteur de puissance, le courant absorbé, etc..., pour différentes valeurs de la charge, en fonction de σ seulement. En pratique, il est beaucoup plus simple d'obtenir graphiquement toutes ces quantités au moyen du diagramme de la figure 4 ; aussi n'abusera-t-on pas des formules, et l'on se contentera de donner dans un tableau les valeurs de la vitesse correspondant à diverses charges :

RAPPORT DU COUPLE AU COUPLE NORMAL	1,5	1	0,75	0,5	0,25
Vitesse.	$\frac{\sqrt{1-4\sigma+\sigma^2}}{1-\sigma}$	1	$\frac{\sqrt{1-\sigma+\sigma^2}}{1-\sigma}$	$\frac{\sqrt{1+\sigma^2}}{1-\sigma}$	$\frac{\sqrt{1+\sigma+\sigma^2}}{1-\sigma}$

RÉSUMÉ DU CALCUL D'UN MOTEUR A RÉPULSION.

Pour calculer un moteur à répulsion par la méthode qui vient d'être exposée, on procède comme suit. On commence par calculer le coefficient de dispersion par la formule de Behn-Eschenburg.

$$\sigma = \frac{4,5}{H^2} + \frac{6\delta}{\tau}$$

et le facteur de puissance $\cos \varphi = \frac{1-\sigma}{1+\sigma}$ à pleine charge.

En admettant pour le rendement la valeur η, on est en mesure de calculer le courant de charge normale i, et d'en déduire le courant magnétisant i_0 par la formule

$$i_0 = i\sqrt{\sigma}$$

ainsi que le courant de court-circuit

$$i_1 = \frac{i}{\sqrt{\sigma}}.$$

Le nombre de tours par pôle est alors donné par l'expression

$$\text{tours par pôle} = k\sqrt{\frac{\text{volts}}{i_0 \,.\, A \,.\, f}} = N.$$

K représente dans cette formule une constante qui dépend de la dimension de l'entrefer et de la disposition de l'enroulement du stator. Dans le cas de petits entrefers, de l'ordre de $0^{mm},75$, avec des enroulements bien répartis, cette constante est d'environ 1400. A désigne la surface totale cylindrique intérieure effective du fer, à l'entrefer ; f est la fréquence

$$\text{calage des balais } \theta = 2\varphi$$

$$\text{courant de démarrage} = i\frac{1+\sigma}{2\sqrt{\sigma}}$$

$$\frac{\text{couple de démarrage}}{\text{couple normal}} = \frac{(1+\sigma)^2}{4\sigma}.$$

Le calcul peut alors se poursuivre, soit en traçant le diagramme de la figure 4, soit en calculant la vitesse et les courants pour différentes valeurs de la charge, en fonction de σ, au moyen des formules dont on a indiqué quelques-unes. On peut ensuite déterminer le flux dans la ligne des balais et le flux perpendiculaire à la ligne des balais aux diverses charges, étudier la commutation, calculer les pertes dans le fer et le cuivre ainsi que le rendement. Dans le cas d'un moteur réversible, comportant deux enroulements distincts, il faut au

préalable déterminer le nombre de tours de chacun des enroulements, l'angle θ étant connu.

De tout ce qui précède, il résulte clairement que le facteur de puissance d'un moteur fonctionnant à une vitesse correspondant à une fraction donnée du synchronisme est tout à fait indépendant de la fréquence. Cette remarque s'applique d'ailleurs à tous les moteurs à courant alternatif, moteurs-série, d'induction, à répulsion, compensés ou non. Aussi est-ce une erreur de prétendre que le facteur de puissance d'un moteur à collecteur est nécessairement faible aux fréquences élevées ; il est bien clair que, si la fréquence est plus grande, une vitesse donnée n'est qu'une fraction plus faible du synchronisme, aussi doit-on s'attendre à ce que le facteur de puissance soit moins bon. Mais le moteur à collecteur n'est nullement en état d'infériorité à ce point de vue. Il se peut, naturellement, que la vitesse la plus favorable d'un type donné de moteur — le moteur série par exemple — soit un multiple si élevé de la vitesse du synchronisme, qu'avec les fréquences élevées, cette vitesse présente des dangers au point de vue mécanique. Ce n'est d'ailleurs pas le cas pour le moteur à répulsion, compensé ou non, dont la vitesse la plus favorable est celle du synchronisme.

On a proposé à plusieurs reprises d'introduire dans le rotor une tension en phase avec OE (fig. 1) dans le but de réaliser les mêmes conditions de fonctionnement à des vitesses autres que celles du synchronisme. Il est clair que si, tout en décalant les balais, on fait varier cette tension proportionnellement à cos θ, les diagrammes donnés plus haut ne cessent pas d'être applicables : la seule différence est que la vitesse a une valeur quelconque différente du synchronisme.

Il est bon de remarquer qu'il n'a pas été tenu compte, dans ce qui précède, des pertes au collecteur. Ces pertes, si elles sont très importantes au démarrage, sont tout à fait négligeables au synchronisme et n'affectent que d'une façon insensible les résultats du diagramme.

F. Creedy.

EXPRESSION DE LA PÉRIODE DE VIBRATION IONIQUE ET ÉLECTRONIQUE ET SES CONSÉQUENCES *(suite)*.

Tension de décomposition et résistivité d'un électrolyte. — Cette question serait résolue en remplaçant dans l'expression de v trouvée précédemment $\left(\frac{m}{V}\right)$ par $\beta \times \frac{1}{\rho^2}$, puisque l'on a :

$$\rho^2 \times \frac{m}{V} = \text{constante} = \beta.$$

Mais c'est là une loi de variation assez complexe et par suite sans intérêt pratique immédiat. On obtient, au contraire, une expression suffisamment approchée mais très simple de la tension de décomposition de l'électrolyte en fonction de la résistivité en traitant le problème directement.

On sait que la capacité d'un conducteur de surface S enveloppé d'un autre dont il est séparé par un diélectrique d'épaisseur ε, a pour expression :

$$c = \frac{S}{4\pi \times k^2 \times \varepsilon} = \frac{S \times K}{4\pi \times \varepsilon},$$

K étant le pouvoir inducteur spécifique $= \frac{1}{k^2}$, k^2 étant la constante d'attraction de la loi de Coulomb.

Or, la loi électrochimique de Faraday donne :

$$q = c \times v = \text{constante, charge d'un ion.}$$

On déduit de l'élimination de c entre ces deux relations :

$$v = \frac{4\pi \times q \times k^2}{S} \times \varepsilon.$$

Nous avons vu d'autre part que l'on avait :

$$\rho^2 \times \frac{1}{\varepsilon^3} = \text{constante},$$

d'où :

$$\varepsilon = \alpha \times \rho^{\frac{2}{3}},$$

et en portant cette valeur de ε dans l'expression précédente de v :

$$v = \gamma \times \rho^{\frac{2}{3}},$$

γ étant une constante.

Ainsi, comme loi approchée, la tension de décomposition d'un électrolyte est proportionnelle à la puissance $\frac{2}{3}$ de sa résistivité.

Cette relation est suffisamment bien vérifiée par l'expérience, comme le montre le tableau suivant, dressé par interpolation des déterminations de Kohlrausch pour la résistivité, de M. Rothé pour la tension de décomposition, des solutions aqueuses d'acide chlorhydrique.

°/° DE HCl	POIDS SPÉCIFIQUE de la SOLUTION	TENSION DE DÉCOMPOSITION (M. Rothé). v	RÉSISTIVITÉ ÉLECTROLYTIQUE (Kohlrausch). ρ	$\log\left(\frac{v}{\rho^{\frac{2}{3}}}\right)$ = constante (?).	$\frac{v}{\rho^{\frac{2}{3}}} = \gamma$ = constante (?).
°/°		volts.	ohms.		
2	1,0096	1,34*	3,5	$\bar{1}$,764	0,581
4	1,0193	1,145*	2,816	$\bar{1}$,759	0,575
5	1,0242	1,07*	2,554*	$\bar{1}$,758	0,573
6	1,0291	0,99*	2,292	$\bar{1}$,756	0,571
10	1,0490	0,92*	1,598*	$\bar{1}$,828	0,673
15	1,0744	0,837	1,352*	$\bar{1}$,835	0,684
16	1,0795	0,82*	1,3462	$\bar{1}$,828	0,673

* Résultat direct de la mesure.

Il y a cependant une légère variation de la quantité γ qui montre bien que ce n'est là qu'une loi approchée. Cela provient peut-être de ce que l'on suppose k^2 de la loi de Coulomb constante. Or cette grandeur a les dimensions du carré d'une vitesse, et il résulte des théories de Maxwell, que l'expérience a vérifiées, que cette grandeur k^2 est inversement proportionnelle au carré de l'indice de réfraction du diélectrique, et par suite directement proportionnelle au carré de la vitesse de la lumière dans le diélectrique considéré.

Or l'indice de réfraction de la dissolution varie avec sa concentration, et l'on peut songer à en tenir compte.

On a établi que l'on avait sensiblement pour tous les corps :

$$\frac{n - 1}{\pi} = \text{constante},$$

n étant l'indice de réfraction du corps de poids spécifique π.

Comme, pour l'eau pure, $n = 1,33$ et $\pi = 1$, on en déduit que la constante en question $= 0,33$, et par suite :

$$n = 1 + 0,33 \times \pi.$$

Nous avons vu d'autre part que l'on avait :

$$v = \frac{4\pi q}{S} \times k^2 \times \varepsilon,$$

et :

$$\rho \times \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{\frac{3}{2}} = \alpha \times \frac{k}{q} \times \sqrt{M},$$

d'où l'on déduit :

$$\varepsilon = \frac{q^{\frac{2}{3}} \times \rho^{\frac{2}{3}}}{\alpha^{\frac{2}{3}} \times k^{\frac{2}{3}} \times M^{\frac{1}{3}}}.$$

En éliminant ε entre ces deux équations, on obtient la relation :

$$v = \theta \times \rho^{\frac{2}{3}} \times k^{\frac{4}{3}},$$

et comme k et n sont inversement proportionnels :

$$v = \theta' \times n^{-\frac{4}{3}} \times \rho^{\frac{2}{3}} = \theta' \times (1 + 0,33 \times \pi)^{-\frac{4}{3}} \times \rho^{\frac{2}{3}}.$$

Vérification expérimentale. — La pseudo-constante γ de la relation précédente devrait donc être égale à :

$$\gamma = \frac{\theta'}{n^{\frac{4}{3}}},$$

et l'on devrait avoir :

$$\gamma \times n^{\frac{4}{3}} = \theta' = \text{constante}.$$

Or, il n'en est rien, ainsi que le montre le tableau suivant (1).

% DE HCl	POIDS SPÉCIFIQUE π	INDICE DE RÉFRACTION $n = 1 + 0,33 \times \pi$.	$\log \gamma + \frac{4}{3} \times \log n$ = constante (?).	$\log\left(\gamma \times n^{\frac{4}{3}}\right)$ = constante (?).
5	1,0242	1,338	$\bar{1},925$	0,075
10	1,0490	1,346	0,000	0,000
15	1,0744	1,355	0,011	0,011

En tenant compte, cependant, d'une variation de la constante d'attraction de la loi de Coulomb par l'indice de réfraction de l'électrolyte considéré, on aurait :

$$\rho \times \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{\frac{3}{2}} \times \frac{1}{k} \times \frac{1}{\sqrt{M}} = \frac{\alpha}{q} = \text{constante},$$

(1) On voit d'ailleurs que la constante γ et l'indice de réfraction n croissent en même temps que la concentration : leur produit ne peut donc être constant. L'hypothèse d'une variation de la constante k^2 de la loi de Coulomb avec la concentration ne se trouve donc pas vérifiée par l'expérience. L'étude de la loi électrochimique de Faraday en fera comprendre la raison.

ou :

$$\rho \times \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{\frac{3}{2}} \times n \times \frac{1}{\sqrt{M}} = \text{constante},$$

n étant l'indice de réfraction de la dissolution pour la concentration considérée.

En remplaçant $\frac{1}{\varepsilon^3}$ par la concentration ionique $\left(\frac{m}{V}\right)$, on peut écrire :

$$\rho \times \left(\frac{m}{V}\right)^{\frac{1}{2}} \times n \times \frac{1}{\sqrt{M}} = \text{constante},$$

et en évaluant l'indice de réfraction n en fonction du poids spécifique π de la solution :

$$\rho \times \left(\frac{m}{V}\right)^{\frac{1}{2}} \times (1 + 0{,}33 \times \pi) \times \frac{1}{\sqrt{M}} = \text{constante}.$$

D'après cela on aurait :

$$\left(\frac{m}{V}\right) = 2 \times \frac{1}{\rho^2 \times n^2},$$

c'est-à-dire que la concentration ionique serait proportionnelle à $\frac{1}{\rho^2 n^2}$.

On voit, par le tableau et les courbes relatifs à l'acide chlorhydrique, que la variation de la concentration ionique $\left(\frac{m}{V}\right)$ en fonction de la concentration totale apparente $\left(\frac{N}{V}\right)$ n'est guère modifiée en pratique par l'introduction de l'indice de réfraction, et conserve sa même allure générale. Il est cependant intéressant de noter que l'inflexion du départ est bien moins prononcée.

Cette relation approchée : $v = \gamma \times \rho^{\frac{2}{3}}$,

exprimée en fonction de la résistivité ;

$$v = \gamma' \times \frac{1}{\left(\frac{m}{V}\right)^{\frac{1}{3}}},$$

exprimée en fonction de la concentration ionique ;

permet d'éliminer v dans la relation trouvée précédemment et d'avoir ainsi une expression indépendante, mais seulement approchée de la concentration ionique ou de la résistivité en fonction de la concentration totale apparente :

$$v = a - b \times \log \frac{\left(\frac{m}{V}\right)^2}{\frac{N}{V} - \frac{m}{V}}$$

d'où :

$$\log \frac{\left(\frac{m}{V}\right)^2}{\frac{N}{V} - \frac{m}{V}} + \alpha' \times \frac{1}{\left(\frac{m}{V}\right)^{\frac{1}{3}}} = a',$$

et :

$$\log \rho^2 \times \left[\rho^2 \frac{N}{V} - \beta\right] - \alpha'' \times \rho^{\frac{2}{3}} = a''.$$

Voici dans quelle mesure cette dernière relation est vérifiée par l'expérience.

Pour déterminer β, on considère le maximum de la fraction ionisée et l'on suppose à ce moment l'ionisation totale, ce qui n'est nullement certain. On aurait alors :

$$\rho^2 \times \frac{m_1}{V} = \rho^2 \times \frac{N}{V} \times \frac{1}{2} = \beta,$$

$\left[\frac{1}{2}\right.$, parce que $\frac{m}{V}$ ne se rapporte qu'à une espèce d'ions, et que chaque équivalent électro-chimique d'électrolyte en donne 2.]

Pour l'acide sulfurique d'après le graphique, la fraction ionisée maxima se produit pour $\frac{N}{V} = 4,6588$, d'après la tangente menée par l'origine.

A ce moment, $\rho = 1,544$. On en déduit :

$$\beta = \rho^2 \times \frac{N}{V} \times \frac{1}{2} = (1,544)^2 \times 4,6588 \times \frac{1}{2} = 5,5531.$$

En prenant comme repères les points à 10 °/₀ et à 25 °/₀ de SO^4H^2, on détermine : $\alpha'' = 1,0783$.

Le tableau suivant montre dans quelle mesure a'' est constant, ρ et $\frac{N}{V}$ ayant les valeurs qui correspondent à la concentration en SO^4H^2 données dans un tableau précédent.

CONCENTRATION EN SO^4H^2	a'' = CONSTANTE (?).
°/₀	
1	— 3,81
2,5	— 1,23
5	— 0,43
10	— 0,26
15	— 0,31
20	— 0,32
25	— 0,25
30	— 0,13
40	+ 0,19

Constance de la charge des ions ; Raison de la loi électrochimique de Faraday. — On a vu que la charge d'un ion, comme celle d'un corps quelconque, pouvait s'écrire :

$$q = c \times v = \text{capacité} \times \text{tension}.$$

Or, la capacité est notablement accrue par le voisinage d'autres conducteurs chargés, ici les autres ions, et, en supposant l'ion de surface S enveloppé d'ions de signe contraire dont il est séparé par un diélectrique d'épaisseur ε, sa capacité a pour expression :

$$c = \frac{S}{4\pi \times k^2} \times \frac{1}{\varepsilon}.$$

D'autre part, il suffit de considérer le tableau des distances explosives en fonction de la tension, donné précédemment, pour constater qu'aux basses tensions tout au moins, la tension d'auto-décharge des ions est directement proportionnelle à la distance ε :

$$v = \alpha \times \varepsilon.$$

Il résulte de là que le produit $c \times v$ est indépendant de ε et par suite constant :

$$q = c \times v = \frac{\alpha \times S}{4\pi \times k^2},$$

C'est l'expression de la loi électrochimique expérimentale de Faraday.

On voit que la charge constante d'un ion est proportionnelle à sa surface. Comme l'expérience a montré que tous les ions prenaient toujours la même charge, on en doit donc conclure que tous les ions ont la même surface S et par suite les mêmes dimensions. On voit en même temps par là que les molécules, au contraire, n'ont pas toutes le même volume, mais un volume proportionnel au nombre d'ions qu'elles renferment. La loi d'Avogadro montre, cependant, qu'un même volume de gaz, à la même température et sous la même pression, contient toujours le même nombre de molécules. La molécule apparaît donc, non comme le résultat d'une fusion de ces divers ions, mais plutôt comme un petit système planétaire distinct, dans l'ensemble matériel, comme le soleil et son cortège de planètes dans la voie lactée, formé de plusieurs ions saturant leur charge électrique, c'est-à-dire leur valence atomique. Dans un corps simple, ces ions sont de même nature, mais ont acquis accidentellement des charges électriques contraires (libération de molécules simples aux électrodes dans le phénomène de l'électrolyse, par exemple); dans un corps composé, ces ions sont de nature différente et de charge électrique normalement contraire.

Il est à noter que la grandeur k^2 de la loi de Coulomb intervient dans l'expression de q, et par suite que la nature du diélectrique n'est pas sans influence sur la charge constante prise par les ions.

(A suivre.) G. ROSSET.

LES TURBINES A GAZ (*fin*) (¹).

On a souligné le manque de documents ou de données qui caractérisait la communication de M. Sékutowicz. Elle ne contient en effet ni description de machines, ni compte rendu d'expériences, ni même un exposé des brevets les plus intéressants. Mais, ceci admis, il est intéressant de savoir si les nombreux calculs de l'auteur et les conclusions auxquelles il a été conduit sont acceptables. Plusieurs ingénieurs, compétents sur cette question, se sont rencontrés pour regretter que ces calculs aient été établis en prenant, pour les chaleurs spécifiques, des valeurs constantes. Cependant les expériences célèbres de MM. Mallard et Le Châtelier ont fourni les valeurs types sur lesquelles ces calculs devaient être basés. M. Barbezat a d'ailleurs démontré dans notre Revue (²) qu'il était possible d'établir sans difficulté une discussion du rendement avec chaleurs spécifiques variables. Cela a d'ailleurs fourni l'occasion d'une digression à l'un des contradicteurs, M. Deschamps a fait observer que la thermodynamique ne peut être qu'une science d'expérience, bien assise dans des limites qui s'écartent peu de 0 à 300 degrés, où les lois qui sont censées régir la production et la transmission de la chaleur sont démontrées sans exactitude. Seules les valeurs des chaleurs spécifiques sont connues en dehors de ces limites. Les hypothèses que l'on bâtit sont souvent téméraires. Et M. Deschamps a montré un exemple des erreurs que l'on peut

(¹) *Éclairage électrique*, tome XLVIII, 28 juillet 1906, p. 133.
(²) *Éclairage électrique*, tome XLI, 12 et 19 nov. 1904, pages 260 et 287.

commettre en discutant le tableau fourni par M. Sékutowicz, relatif aux moteurs à explosion avec compression adiabatique. Ce tableau indique en effet que si un mélange à 260 calories est comprimé à 15 kilogrammes et explose, la pression doit monter à 49 kilogrammes. Or un mélange à 260 calories n'explose pas pratiquement. Il faut un mélange plus riche en gaz, à 500 calories, par exemple, comme celui de gaz très pauvre de haut fourneau. Avec le même calcul du tableau, la pression finale serait de 84 kilogrammes, tandis que l'expérience montre que, dans ces conditions, elle atteint généralement de 25 à 30 kilogrammes.

Certaines idées émises dans la communication ont été aussi très discutées. En particulier celle-ci que la détente pourra être rigoureusement adiabatique dans les turbines à gaz. Certainement, la détente rapide dans une tuyère s'effectuera avec moins de perte de chaleur aux parois que pour les moteurs à piston, mais ce serait une grave erreur que de croire à la possibilité de ne pas refroidir les parois. Bien au contraire, ce refroidissement nécessaire est la source d'une grosse difficulté. Nous verrons en effet plus loin comment le problème a été résolu dans la turbine de MM. Armengaud et Lemâle qui nous paraît être de beaucoup la plus voisine d'une solution d'ensemble satisfaisante. De plus, c'est d'une façon tout à fait arbitraire que la température d'échappement est fixée à 400° par M. Sékutowicz. L'augmentation de la température d'échappement que l'auteur de la communication n'a pas prévue et pour laquelle il n'a pas indiqué de moyens a justement une importance capitale dans les turbines à gaz. Il existe à cet effet plusieurs solutions. On peut soit employer des aciers spéciaux résistant aux hautes températures, soit ajouter au jet de gaz trop chaud un jet de vapeur relativement froid, soit enfin refroidir le disque par une circulation d'eau intérieure. Les deux articles parus dans l'*Éclairage Électrique* en novembre 1904 sur les turbines à gaz exposent du reste ces diverses solutions avec détails.

Enfin, certains ingénieurs ne partagent guère le pessimisme que nous avons fait ressortir dans notre analyse au sujet des turbines à explosion. Les hautes températures de la chambre d'explosion ne leur paraissent pas en effet une objection raisonnable quant à l'emploi des soupapes. Celles-ci existent bien dans les moteurs à piston, et on néglige même de les refroidir. La variabilité de l'écoulement des gaz brûlés est un argument autrement grave. Cependant on a proposé plusieurs moyens pour y remédier. La Gasmotoren Fabrik de Deutz prévoit un réservoir formant volant et limitant beaucoup les écarts de pression ; M. Stodola préconise d'étrangler plus ou moins la veine avec un pointeau; d'autres préfèrent mélanger les gaz provenant de plusieurs explosions et inégalement détendus, mais la force vive n'est-elle pas en grande partie détruite ? M. Sékutowicz a déclaré cette destruction de force vive certaine et il s'est appuyé pour la démontrer sur la théorie des trompes. M. Deschamps a critiqué l'équation fondamentale de cette théorie et par suite, il a donné au débat une ampleur telle que nous ne le suivrons pas, tout en reconnaissant la valeur des arguments qu'il a apportés.

Car il est temps de laisser cette discussion certainement très intéressante, qui a attiré sur les turbines à gaz l'attention du monde technique, pour passer au domaine de la pratique et voir quel est, à l'heure actuelle, le degré d'avancement de cette question.

Les essais effectués à l'heure actuelle ne sont pas nombreux. Deux seulement ont eu les honneurs de diverses publications. Ce sont ceux de la turbine Stolze en Allemagne et ceux de la turbine de MM. Armengaud et Lemâle en France.

La première est une machine à air chaud. Le principe en est le suivant : on comprime de l'air à une tension modérée (1 atm. 1/2 par exemple au-dessus de la pression atmosphérique). Puis on réchauffe cet air comprimé jusqu'à lui faire prendre à la même tension un volume de 2 à 2 fois et demi plus grand, après quoi cet air peut se détendre de nouveau à la pression

atmosphérique. C'est à l'accroissement de volume résultant de l'échauffement qu'est dû l'excès de travail fourni sur l'énergie absorbée. La dernière description, que l'on donnait d'un moteur de 200 chevaux en cours de construction à Berlin, était la suivante: « Sur un axe commun (fig. 1) sont montés deux systèmes de turbines d'une construction différente ; l'un de ces systèmes sert de compresseur d'air alors que l'autre imprime à l'axe un mouvement rotatoire sous l'action de l'air chauffé. L'un et l'autre de ces systèmes consistent en plusieurs séries de palettes fixes attachées à la bâche de la machine et de palettes mobiles d'une construction analogue, montées sur un cône animé d'un mouvement de révolution et tournant avec l'arbre de la turbine. L'un de ces systèmes de palettes aspire de l'air frais pour le comprimer à la pression voulue, puis le chasse à travers un réchauffeur chauffé par les gaz d'échappement ; la plus grande portion de cet air entre ensuite dans une chambre

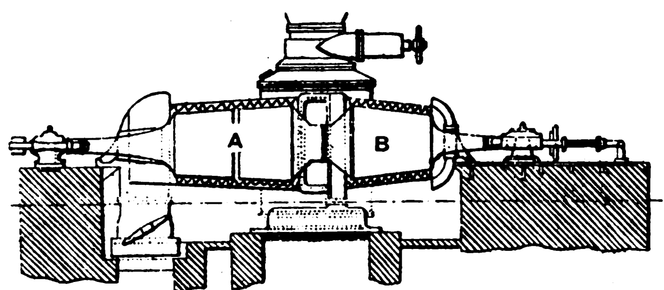


Fig. 1. — Turbine à gaz Stolze. A, turbine à gaz; B, turbine de compression.

recouverte d'une matière incombustible, alors que le reste est amené au-dessous de la grille d'un générateur où il gazéfie un combustible approprié. Le gaz ainsi formé pénètre dans la chambre où, étant brûlé par l'air comprimé, il se transforme en acide carbonique et en vapeur tout en développant une grande quantité de chaleur ; ces gaz entrent ensuite dans le second système de turbines où ils fournissent du travail utile par leur expansion, en traversant les différents degrés ».

Telle était la description donnée dans *l'Éclairage Électrique* du 26 novembre 1904. Depuis, nous n'avons plus eu connaissance d'autres résultats et, par suite, nous ne croyons pas que la construction ait été achevée. Quoi qu'il en soit, cette turbine se présente comme une turbine à air chaud. Elle n'utilise avec le combustible que de l'air atmosphérique. C'est bien là la turbine qui serait la moins compliquée si on la réalisait. Mais les difficultés de réalisation d'une telle machine sont des plus grandes. Tous les ingénieurs qui se sont intéressés à la question, en particulier M. Neilson puis, tout récemment, M. J. Rey à la Société des Ingénieurs civils et M. Dugald-Clerk à New-York, arrivent à la conclusion que les difficultés pratiques de construction des turbines à gaz dans l'acception la plus simple du terme sont insurmontables, surtout celles qui sont causées par les hautes températures, car, pour améliorer le rendement de ces machines, il faudrait détendre les gaz sur les roues de la turbine à une température très élevée à moins d'augmenter notablement le rapport de compression. Mais alors, dans le second cas, la construction du compresseur serait impraticable. Quant à pouvoir construire les disques mobiles à grande vitesse qui résistent à des températures de 5 à 600° C, l'état actuel de l'industrie ne le permet que difficilement.

Aussi accordons-nous beaucoup plus de confiance aux essais poursuivis par la Société des Turbomoteurs. Les brevets de MM. Armengaud et Lemâle, qu'elle applique, concernent en effet une turbine mixte, c'est-à-dire une turbine dans laquelle les gaz brûlés n'agissent

pas seuls sur les aubages de la turbine, mais conjointement avec une certaine quantité de vapeur qu'on peut ou bien mélanger aux gaz brûlés avant leur détente pour abaisser leur température, ou bien faire agir directement sur les aubages de la turbine pour refroidir ces aubages simplement, ou enfin diviser en deux parties de manière à appliquer ces deux modes de refroidissement à la fois. Ces principes ont d'ailleurs été exposés dans les deux articles de *l'Éclairage Électrique* auxquels nous avons déjà fait allusion. Nous nous dispenserons d'y revenir et nous nous bornerons à donner une description sommaire du Turbo-Compresseur de 300 chevaux que cette Société met actuellement en essais.

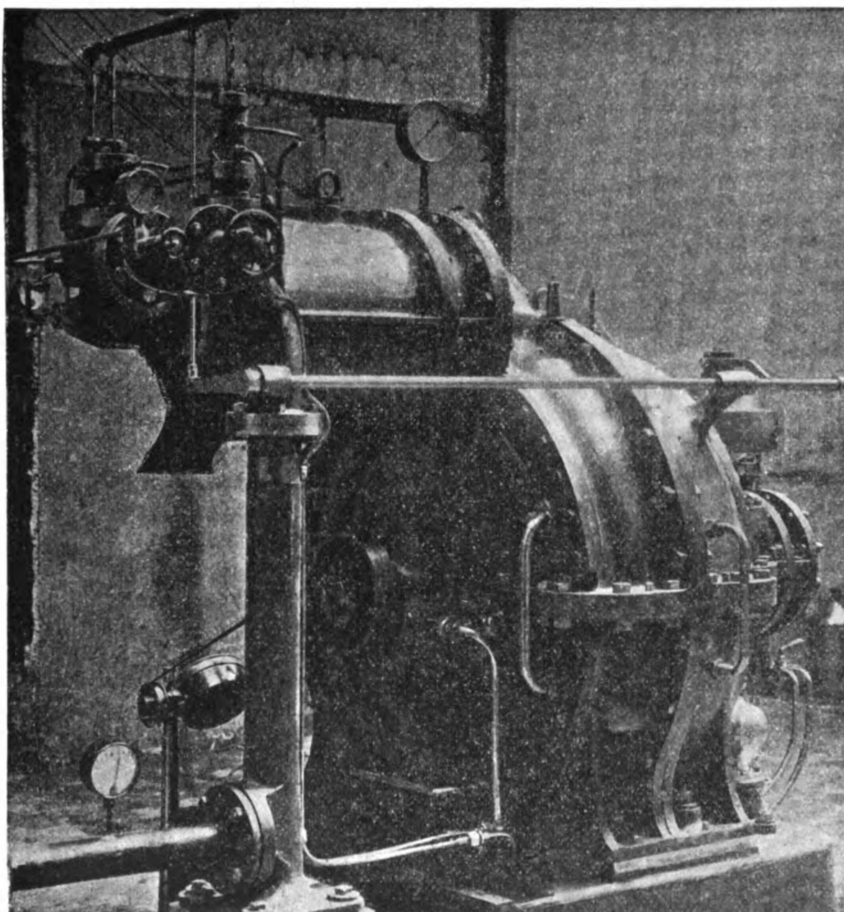


Fig. 2. — Turbine à gaz Armengaud et Lemâle.

L'unité comprend : la turbine proprement dite (fig. 2 et 3), construite chez Cohendet et Cie à Paris, et le compresseur polycellulaire du système Rateau-Armengaud qui alimentera cette turbine. Ce dernier est construit chez Brown-Boveri et Cie à Baden. Pour simplifier les essais de ces deux nouvelles machines, on a branché la turbine (fig. 2 et 3), sur le secteur parisien de l'air comprimé et on procède en ce moment à sa mise au point indépendamment du compresseur qui, de son côté, est actuellement soumis aux essais à Baden. On l'entraîne par une turbine à vapeur Brown.

Le travail à vide des compresseurs polycellulaires étant assez important, il fallait le répartir sur un débit d'air ou une puissance utile suffisante pour obtenir un rendement acceptable. Le compresseur débite en marche normale, à la vitesse de 4 000 tours par minute, 3 600 mètres cubes par heure sous la pression de 5 kilogrammes par cm². Une moitié de cet air environ sert à alimenter la turbine et l'autre moitié représente le travail utile du groupe. Mais on peut faire passer tout l'air débité par le compresseur à travers la turbine et doubler la puissance disponible ainsi pour une réceptrice quelconque accouplée en bout de la turbine.

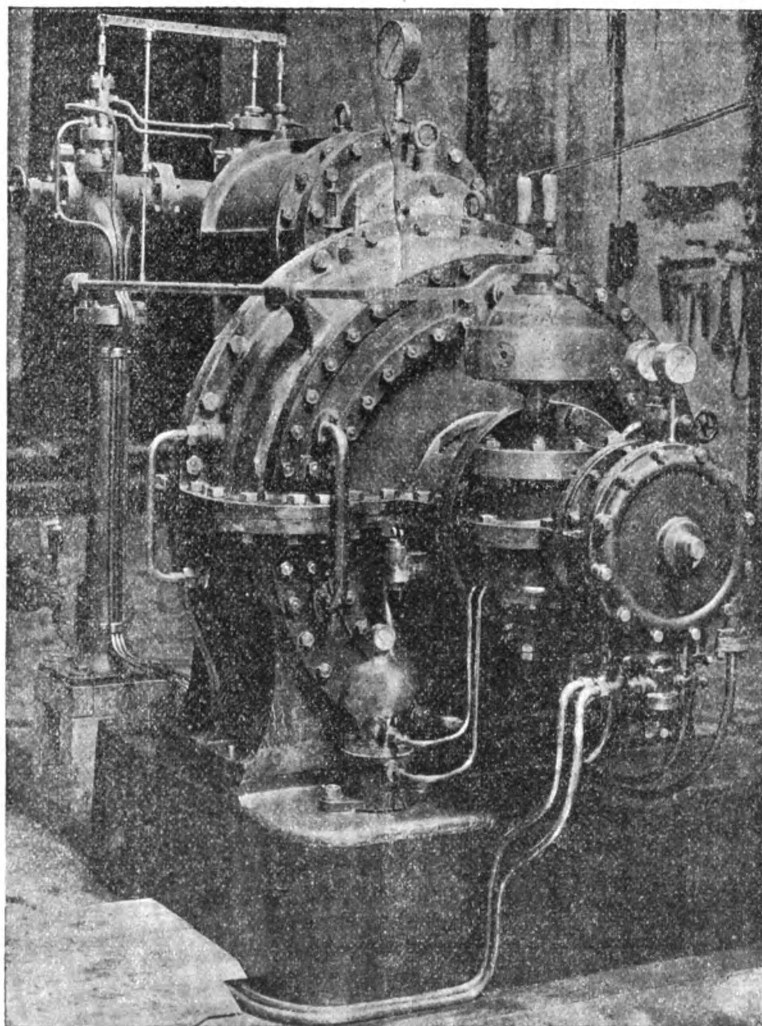


Fig. 3. — Turbine à gaz Armengaud et Lemâle.

Le compresseur (fig. 4) comprend une vingtaine d'éléments semblables disposés en série et répartis en trois corps distincts. Chaque élément est refroidi par une enveloppe d'eau et entre chaque corps l'air passe dans un refroidisseur énergique pour assurer une compression très voisine de l'isotherme. Chaque corps pourra être disposé soit en aval, soit en amont de la turbine pour vérifier s'il est préférable d'aspirer l'air ou de le comprimer en vue d'obtenir, pour

le rapport des pressions absolues, la valeur de 6 kilogrammes-cm² qu'on s'est fixée. L'élément se compose de deux parties essentielles, la roue à ailettes et le diffuseur. Le diffuseur a pour but d'obtenir des sections d'écoulement de plus en plus grandes afin de réduire convenablement la vitesse absolue de l'air à la sortie de la roue à ailettes et de transformer ainsi l'énergie cinétique en force vive. — Le rendement de ce compresseur sera amélioré encore par suite du perfectionnement très efficace qui consiste à refroidir l'air sur son parcours et au fur et à mesure de sa compression. — D'ailleurs toute amélioration du rendement du compresseur doit avoir une grande influence sur la valeur économique de la turbine.

La figure 2 montre la turbine vue du côté où viendra s'accoupler le compresseur. On y remarque la conduite d'amenée de l'air qui est fixée verticalement sur le socle du compresseur. Ce socle sera relié à celui de la turbine par quatre boulons. La chambre de combustion s'appuiera sur la volute d'aspiration du compresseur. L'arbre du compresseur sera accouplé avec celui de la turbine par un manchon à griffes. L'avant de cette chambre, dans lequel se fait la combustion, est garni intérieurement d'une gaine en carborandum (carbure

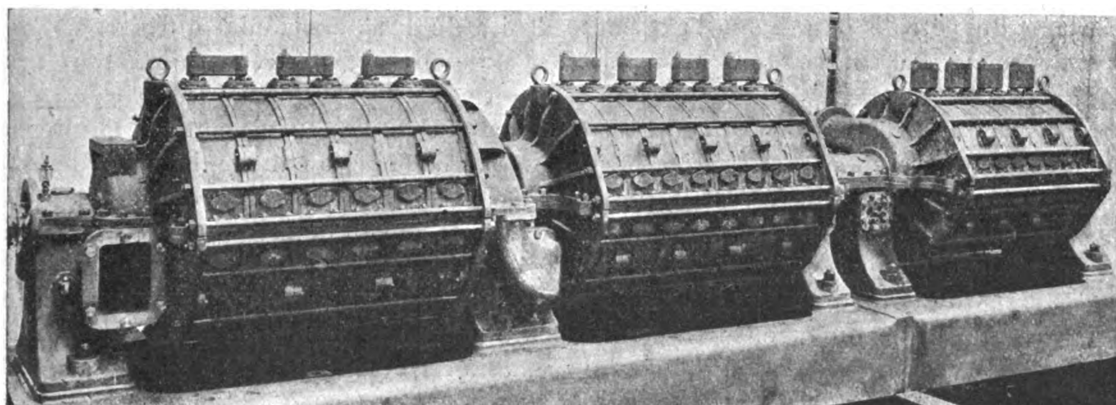


Fig. 4. — Compresseur ventilateur Rateau-Armengaud.

de silicium) maintenue dans une enveloppe en fonte entourée elle-même d'eau ou d'air. Entre le carborandum et l'enveloppe de fonte se trouve une matière calorifuge légèrement compressible, capable, tout en soutenant le carborandum contre la pression intérieure, de compenser les différences de dilatation de ces deux corps; l'arrière est formé d'une partie métallique dans laquelle circule l'eau ou la vapeur de refroidissement. Celle-ci vient déboucher à l'intérieur de la chambre par une série d'ouvertures radiales. Le conduit d'amenée du pétrole sous pression suit le tuyau vertical d'arrivée d'air, passe par un robinet à pointeau dont la vanne de commande est à côté de celle de l'air, traverse un second robinet de réglage et arrive dans la chambre par un pulvérisateur muni à son extrémité d'un filament de platine. Celui-ci est porté à l'incandescence en abaissant le levier de contact du courant électrique dans la position indiquée sur la figure. Les gaz chauds se détendent à travers un certain nombre de tuyères (30 environ) convergentes-divergentes, réparties sur la moitié supérieure du carter, avant d'arriver sur le disque de la turbine. Ce disque est du type Curtis à double rangée d'aubes et il mesure environ 1 mètre de diamètre. D'autres tuyères occupent le troisième quart de la couronne d'admission des gaz et peuvent être combinées avec les précédentes quand tout l'air débité par le compresseur est envoyé

dans la turbine. Enfin les tuyères occupant le quatrième quart de la couronne d'admission sont réservées pour la vapeur non mélangée aux gaz avant détente. A égalité de chute de pression, les tuyères sont moins longues quc celles des turbines de Laval. La détente complète s'opère en une seule fois afin qu'à l'arrivée sur les aubes, les gaz soient à une température suffisamment basse.

Enfin pour terminer cette description, nous citerons le tachymètre, les conduites d'eau pour le refroidissement des paliers et celles de l'enveloppe d'eau qui entoure toute la machine.

La figure 3 représente une vue, en bout, de la turbine. Au premier plan l'on voit deux pompes centrifuges munies de filtres à l'aspiration ; l'une d'elles comprime le pétrole, l'autre l'eau d'alimentation. Le régulateur Hartung mû par une vis sans fin commande, par un renvoi, un bras de levier horizontal qui soulève ou abaisse un petit piston équilibré attaché à son extrémité de gauche. Ce piston envoie de l'huile sous pression soit au-dessus, soit au-dessous d'un piston placé sur la tige de la vanne de réglage de l'air. Cette vanne est la troisième à partir de la gauche sur la figure. Elle sert à étrangler plus ou moins la section de passage de l'air en cet endroit. La tige entraîne dans son mouvement vertical le pointeau de réglage du pétrole situé sous l'extrémité droite du bras horizontal qui sert en même temps de relais. La composition du mélange d'air et de pétrole reste ainsi toujours la même.

Sur l'arbre du régulateur est calée une petite pompe rotative fournissant de l'huile sous la pression de 2 atmosphères. Le réservoir d'huile est fixé sur la gauche du socle de la turbine. Une soupape de sûreté met la pompe en court-circuit quand la consommation en huile sous pression diminue. Enfin, sur le haut du bâtis, on voit deux pyromètres électriques indiquant la température des gaz avant et après leur détente.

Les tuyères de détente, les aubes fixes, etc., sont refroidies spécialement par circulation d'eau. Le disque du type Curtis a été exécuté en trois exemplaires : en acier au nickel ordinaire, avec et sans circulation intérieure d'eau de refroidissement et enfin en acier spécial devant résister à de très hautes températures.

De cet exposé des essais faits à l'heure actuelle, que pouvons-nous conclure au sujet de l'avenir réservé aux turbines à gaz ? Certes, tant que les essais définitifs de l'ensemble de la turbine accouplée à son compresseur n'auront pas été effectués, il sera difficile de donner une opinion ferme et précise. On doit espérer cependant que les résultats obtenus seront encourageants sinon de nature à satisfaire complètement et immédiatement les desiderata auxquels doit répondre une machine industrielle. Mais il faut se rappeler que les turbines à vapeur ont mis des années avant d'être « au point » et l'étude de leur évolution depuis 1883, couronnée aujourd'hui par leur immense succès, nous enseigne à ne pas vouloir trop exiger du premier coup. On a beaucoup parlé ces temps derniers des turbines à gaz. Elles ont des partisans fervents et des détracteurs aussi convaincus. Nous croyons qu'il faut pour l'instant se tenir dans un juste milieu et que, si l'on excepte les turbines à gaz au sens absolu du mot dont les difficultés de construction semblent vraiment trop considérables à l'heure actuelle, il y a lieu d'attendre des résultats pratiques des turbines mixtes avec la restriction, croyons-nous, que leur rendement ne pourra être industriel que pour de grosses unités, ce qui limiterait leurs applications possibles aux groupes électrogènes et à la propulsion des navires.

A. Becq.

REVUE INDUSTRIELLE ET SCIENTIFIQUE

THÉORIES ET GÉNÉRALITÉS

Contribution à la théorie de l'arc chantant *(fin)*. — **H. Th. Simon.** — *Physikalische Zeitschrift*, 1er juillet 1906.

6° L'auteur a fait une autre série d'expériences pour étudier en détail le phénomène de la formation des oscillations : pour cela, on procédait à des enregistrements oscillographiques. Les oscillogrammes montrent que le courant et la tension débutent avec de faibles amplitudes et croissent jusqu'à une valeur limite. Si l'on trace, d'après un oscillogramme, la caractéristique d'établissement, on constate sur cette caractéristique les phénomènes suivants : la différence de potentiel aux bornes de l'arc cherche à charger la capacité : le courant de charge doit, par suite de la présence de la self-induction L_2, avoir des tendances à présenter la forme d'une oscillation sinusoïdale amortie. Le courant $J_0 = i_1 + i_2$ étant constant, ce courant est emprunté au courant de l'arc, de sorte que celui-ci diminue et que la différence de potentiel aux bornes commence à décrire un cycle d'hystérésis. Tant que l'on a

$$\left| \int_0^T e_2' i_2 dt \right| > \left| \int i_2^2 w_2 dt \right|,$$

l'amplitude du courant augmente d'une façon continue et la surface du cycle d'hystérésis s'étend de plus en plus. Sa déformation progressive jusqu'à la forme finale entraîne une diminution numérique de l'intégrale de gauche qui diffère de plus en plus de l'unité. Quand l'amplitude du courant croît, il se produit de plus en plus de portions montantes dans la branche descendante de la courbe de courant, et de portions tombantes dans la branche montante de la courbe de courant, c'est-à-dire de portions qui comptent négativement dans l'intégrale $\int_0^T e_2' i_2 dt$. L'amplitude de courant pour laquelle l'état stationnaire est atteint dépend des conditions particulières de fonctionnement.

7° Lorsque l'on adjoint le circuit oscillant à un arc à courant continu d'intensité relativement grande et que l'on diminue l'intensité de courant par une augmentation rapide de la résistance en série avec l'arc, celui-ci ne peut plus entretenir les oscillations. Pour une intensité déterminée, les oscillations s'établissent avec une très faible amplitude pour croître rapidement ensuite. La tension présente aussi des oscillations dont l'amplitude croît de plus en plus. L'amplitude du courant devient rapidement assez grande pour que, pendant l'oscillation de charge, le courant s'annulle entièrement dans l'arc, et que l'oscillation de décharge soit obligée de rallumer cet arc. Pour que la différence de potentiel devienne suffisante pour provoquer ce rallumage, il faut un temps plus ou moins long, suivant la rapidité avec laquelle la source d'énergie électrique charge la capacité : ce temps est évidemment d'autant plus long que J_0 a une valeur plus faible. Par conséquent, comme on le voit, les durées d'oscillations vont toujours en croissant quand J_0 va en décroissant. Pendant ces temps d'arrêt, la cathode se refroidit de plus en plus : il faut donc des tensions de rallumage de plus en plus élevées ; jusqu'à ce qu'enfin ce rallumage ne soit plus possible. Les oscillogrammes relevés par l'auteur montrent les faits suivants :

a) Plus est faible l'intensité du courant continu de l'arc, et plus les amplitudes d'oscillations sont élevées, toutes les autres conditions restant les mêmes.

b) L'amplitude d'oscillations du courant peut devenir plus grande que l'intensité du courant continu J_0 : la forme des oscillations doit alors s'écarter de plus en plus de la forme sinusoïdale.

c) Dans le dernier cas, la fréquence d'oscillations dépend de plus en plus de l'intensité du courant J_0, T croissant quand J_0 décroît, c'est-à-dire quand la résistance en série augmente de valeur.

8° Une expérience correspondante a été faite par l'auteur sur l'influence de la longueur de l'arc. Celle-ci fut choisie très petite pour une intensité de courant qui ne pouvait pas encore entretenir les oscillations. On augmentait ensuite rapidement la longueur de l'arc. Les résultats de cette expérience montrent que la variation rapide de la différence de potentiel de l'arc due à l'allongement de celui-ci produit d'abord dans le circuit dérivé une oscillation amortie de charge, mais que l'on ar-

rive finalement à la condition pour laquelle se produit le phénomène de l'arc chantant. Les amplitudes croissent très rapidement jusqu'à la valeur J_0 et au delà, de sorte que les durées d'oscillations deviennent de plus en plus grandes et que l'arc finit par s'éteindre.

On peut donc dire que :

d) Plus l'arc est long, toutes autres conditions restant égales, mieux il est en état de produire des oscillations, c'est-à-dire plus grand est le terme $\int_0^T e_2' i_1 dt$.

e) La durée d'oscillations croît avec la longueur d'arc.

f) La durée d'oscillations croît avec l'amplitude du courant.

g) Plus est grande l'inclinaison de la caractéristique à courant continu au point où brûle l'arc à courant continu employé pour produire des oscillations, plus celui-ci est apte à produire les oscillations et plus les amplitudes sont grandes.

9° Tous ces faits sont faciles à expliquer par la théorie de l'hystérésis de l'arc donnée par l'auteur.

Cette théorie admet que le produit TF de la température T par la surface F du cratère négatif est déterminant pour la chute de tension que produit un courant déterminé. Dans l'arc à courant continu, TF se présente en première approximation comme un état d'équilibre entre la quantité de chaleur développée, proportionnelle à *ei*, et la perte de chaleur W (TF) mesurée par la constante caractéristique W (chaleur dégagée par seconde et unité de TF): on a la relation

$$ei = W\,(TF). \qquad (4)$$

Si l'on connaît les résistances de l'arc correspondant aux différentes valeurs de TF, on peut, dans le diagramme *ei*, tracer de l'origine un groupe de rayons TF donnant la caractéristique statique par leurs points d'intersection avec les valeurs de *ei* correspondantes, d'après l'équation 4. A l'état variable, on a, au lieu de l'équation (4), l'équation.

$$ei = W\,(TF) + L\frac{d(TF)}{dt}. \qquad (5)$$

Si *ei* varie d'après une certaine loi en fonction du temps, on trouve par intégration la loi d'après laquelle varie TF en fonction du temps. Les points d'intersection des hyperboles de puissance et des rayons TF correspondant à des temps égaux définissent la caractéristique dynamique.

10° En première approximation, on peut admettre que, dans l'arc chantant, *ei* varie suivant la loi $ei = A + A\sin\omega t$ (6)
car, en première approximation, on a :

$$i_1 = J_0 + J_1'\sin\omega t$$

et $e_1 = E_0 + E_1'\sin(\omega t + 180) = E_0 - E_1'\sin\omega t$.

En première approximation, on a donc pour *ei* la formule :

$$ei = E_0 J_0 + (E_0 J_1' - E_1' J_0)\sin\omega t - E_1' J_1'\sin^2\omega t.$$

Si l'on trace la courbe $e_1 i_1$, on voit que le deuxième terme de cette équation l'emporte considérablement sur le troisième et que l'on doit poser en première approximation

$$ei = A + B\sin\omega t.$$

On doit intégrer, dans ces conditions, l'équation :

$$A + B\sin\omega t = W\,(TF) + L\frac{\partial(TF)}{\partial t}. \qquad (7)$$

On obtient alors le résultat suivant :

$$tf = T_0F_0 + \frac{(B/W)}{\sqrt{1 + (\omega^2L^2/W^2)}}\sin(\omega t - \varphi) + k\varepsilon^{-(W/L)t}$$

où φ est défini par la relation suivante

$$\operatorname{tg}\varphi = \omega L/W.$$

On voit donc que, pour une puissance variant sinusoïdalement en deçà et au delà d'une valeur constante, le produit *tf* présente, au bout de quelque temps, des oscillations sinusoïdales en deçà et au delà de la valeur constante définie par $T_0F_0 = A/W$, avec une amplitude déterminée par le terme $\frac{(B/W)}{\sqrt{1 + (\omega^2L^2/W^2)}}$ et avec un décalage déterminé par la relation $\operatorname{tg}\varphi = \omega L/W$.

En supposant la caractéristique statique d'un arc de 1 millimètre entre charbons homogènes définie par la relation de Ayrton $ei = 40 + 46i$, l'auteur a fait le calcul et la construction pour quelques cas.

a) Influence du point de la caractéristique statique auquel correspond l'arc employé (fig. 2).

$$W = 5; \quad W/L = 3000; \quad \omega = 3000;$$

$$\operatorname{tg}\varphi = 1; \quad \varphi = 45°$$

$$ei = A + 30\sin(3000\,t)$$

$$tf = T_0F_0 + 4{,}25\sin(3000\,t - 45°)$$

point *a)* $A = 200$; $T_0F_0 = 40$
— *b)* $A = 150$; $T_0F_0 = 30$
— *c)* $A = 100$; $T_0F_0 = 20$
— *d)* $A = 50$; $T_0F_0 = 10$.

On voit que la caractéristique dynamique est d'autant plus tombante, toutes autres conditions restant les mêmes, que l'intensité du courant d'alimentation de l'arc employé est plus faible. Ce résultat concorde avec le fait expérimental que l'arc ne présente le phénomène de l'arc chantant qu'au-dessous d'une certaine intensité

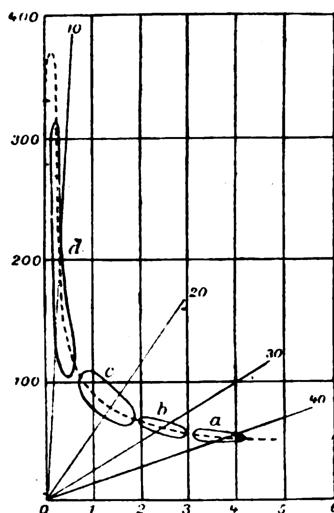


Fig. 2.

de courant (au-dessous de 3 ampères environ dans le cas dont il s'agit). Il excite d'autant plus violemment les oscillations que l'intensité de courant est plus faible. Un abaissement de l'intensité amène facilement des amplitudes d'oscillations supérieures à l'intensité du courant d'alimentation de l'arc : il se produit alors des extinctions.

b) Influence de la fréquence (fig. 3).

$W = 5$; $W/L = 3000$
$ei = 150 + 30 \sin \omega t$; $T_0F_0 = 30$

point *a)* $\omega = 1000$; $\operatorname{tg} \varphi = 0{,}33$; $\varphi = 20$
$tf = 30 + 6 \sin (1000\, t - 20°)$
— *b)* $\omega = 3000$; $\operatorname{tg} \varphi = 1$; $\varphi = -45°$
$tf = 30 + 4{,}25 \sin (3000\, t + 45°)$
— *c)* $\omega = 6000$; $\operatorname{tg} \varphi = 2$; $\varphi = 60$
$tf = 30 + 2{,}23 \sin (6000\, t - 60°)$.

On voit que, quand la fréquence croît, le cycle caractéristique tourne de plus en plus dans le sens pour lequel le caractère tombant de la courbe se transforme en caractère montant. L'arc ne peut donc pas produire d'oscillations au delà d'une certaine fréquence. La fréquence limite

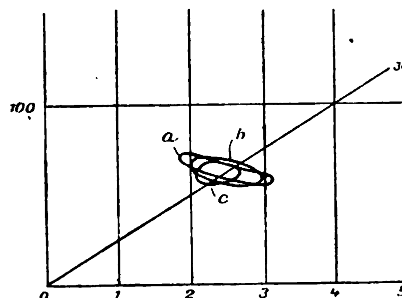


Fig. 3.

est d'autant plus élevée que l'intensité du courant d'alimentation est plus faible Pour atteindre des fréquences élevées, il faut donc opérer avec des intensités très faibles dans l'arc, c'est-à-dire avec des tensions élevées et de fortes résistances en série.

c) Influence de l'amplitude (fig. 4).

$W = 5$; $W/L = 3000$; $\omega = 3000$
$ei = 150 + \sin 3000\, t$; $\operatorname{tg} \varphi = 1$; $\varphi = 45°$

$$tf = 30 + \frac{B}{5\sqrt{2}} \sin (3000\, t - 45°)$$

point *a)* $B = 30$
— *b)* $B = 50$
— *c)* $B = 100$
— *d)* $B = 130$.

d) Influence de la longueur d'arc.

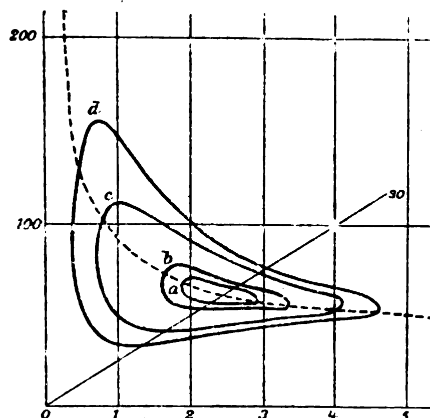


Fig. 4.

D'après les étude de Mᵉ Ayrton, les caractéristiques statiques tendent vers des valeurs tou-

jours plus élevées de la tension quand la longueur de l'arc croît. Donc, plus l'arc est long, toutes autres conditions restant les mêmes, et plus il est susceptible d'engendrer des oscillations. Ce fait est en accord avec l'expérience. Au lieu d'allonger l'arc, on obtient de meilleurs résultats, pour accroître sa propriété de produire des oscillations, en plaçant en série plusieurs arcs. Les caractéristiques se superposent et l'on obtient une grande augmentation de la chute de tension sans que cet avantage soit compensé par une augmentation de la résistance de l'arc. Ce procédé repose sur le même principe que la subdivision des étincelles en télégraphie sans fil.

e) Influence de la constitution des électrodes et du gaz environnant. — Si l'on modifie les valeurs de W/L, constantes de l'arc, on voit qu'une augmentation de W/L fait tourner en arrière les cycles. Pour $W/L = 18000$ au lieu de 3000, on obtient, par exemple, pour $\omega = 6000$, $\mathrm{tg}\,\varphi = 0{,}33$, $\varphi = 20°$, et le cycle caractéristique est maintenant le même pour $\omega = 6000$ que pour $\omega = 1000$ avec $W/L = 3000$. Pour $W/L = 18000$, des oscillations de fréquence 6000 sont encore possibles, qui n'eussent pas été possibles pour $W/L = 3000$.

Si, d'autre part, W/L est petit, la limite des fréquences possibles s'abaisse de plus en plus. C'est le cas pour les charbons à mèche par exemple, comme le montrent les caractéristiques relevées avec ces électrodes. On n'obtient avec ces charbons aucune oscillation ayant l'une des fréquences qu'il est possible d'obtenir avec les capacités et les self-inductions dont on dispose normalement.

11° Production d'oscillations de haute fréquence. — Ce problème se rattache à la télégraphie sans fil. L'arc qui produit les oscillations doit être alimenté par un courant de faible intensité. L'arc doit avoir une caractéristique statique fortement tombante et une valeur élevée de la constante W/L. Les métaux doivent constituer, à ce point de vue, de bonnes électrodes à cause de leur grande conductibilité calorifique. Avec des électrodes en charbon, on pourrait aussi obtenir des résultats en les refroidissant le plus possible, par exemple en les plaçant dans un gaz de conductibilité calorifique élevée, tel que l'hydrogène.

R. V.

***Sur les propriétés magnétiques du fer électrolytique.* — C.-F. Burgess et A.-H. Taylor.** — *Electrical Review, N.-Y.*, 9 juin 1906.

Le fer déposé électrolytiquement d'une solution aqueuse n'est pas nécessairement un produit défini, mais sa composition chimique et sa constitution physique varient suivant la valeur des différents facteurs dont dépend le dépôt. Le fer électrolytique présente une grande pureté, et il est probable qu'aucun autre procédé ne permet de purifier autant le fer que la méthode électrolytique. Le fer absolument pur n'a jamais été obtenu, ni électrolytiquement, ni autrement.

Jusqu'à une époque comparativement très rapprochée, le fer électrolytique était un objet de curiosité par suite des difficultés de sa préparation. Depuis quelques années, des recherches ont été entreprises au laboratoire de l'Université de Wisconsin pour la production du fer électrolytique en grandes quantités, et l'on est parvenu à purifier le fer dans des conditions de vitesse et de prix comparables à celles du cuivre électrolytique. Des études ont été faites sur les propriétés du fer électrolytique et des différents alliages qui en dérivent; à l'institut Carnegie, de Washington, on a produit sans difficulté une tonne de fer électrolytique en plaques de $2^{cm},5$ d'épaisseur pesant 30 kilogrammes. En poursuivant la solution du problème de la préparation en grandes quantités, on a négligé la recherche d'une grande pureté. Les échantillons du fer électrolytique ont présenté la composition suivante :

	ÉCHANTILLON n° 1.	ÉCHANTILLON n° 2.
Soufre	»	0,001 °/o
Silicium	0,013	0,003
Phosphore	0,004	0,020
Manganèse	»	»
Carbone	0,012	0,033
Hydrogène	0,072	0,083

On voit qu'il existe, dans ce fer, de l'hydrogène en quantité supérieure à la somme de toutes les autres impuretés : c'est à la présence de cet élément que l'on attribue généralement les propriétés particulières du fer électrolytique. Le fer électrolytique est dur et cassant : en le chauffant à une température de 1000° environ, il de-

vient mou et malléable. La cause exacte de cette modification de propriétés physiques n'est pas nettement apparente, quoique, par suite du dégagement d'hydrogène avec la température, on puisse admettre que la dureté du fer et sa teneur en hydrogène sont intimement liées entre elles. Mais cette relation peut être mise en doute par suite du fait que des quantités analogues d'hydrogène ont été trouvées dans le fer électrolytique mou fondu et dans le fer dur cassant avant sa fusion.

On sait que les propriétés magnétiques du fer sont altérées d'une façon importante par un traitement à la chaleur, et les auteurs se sont proposé d'étudier les relations existant entre la force coercitive, la perméabilité, la constante d'hystérésis et la température à laquelle le fer est chauffé.

Pour préparer les échantillons d'essai nécessaires pour faire les mesures magnétiques par la méthode de l'anneau de Rowland, les auteurs ont déposé des plaques de fer électrolytique d'environ 25 millimètres d'épaisseur au moyen d'une solution de sulfate ferreux légèrement acide, contenant aussi une faible quantité de sulfate d'ammonium. Le dépôt exigeait environ huit semaines. L'anneau était taillé dans cette plaque, et l'on prenait grand soin que, pendant cette opération, elle ne subît aucun échauffement. Cet anneau était recouvert d'un enroulement primaire établi pour produire une intensité de champ de 20 dynes par ampère de courant primaire, et d'un enroulement secondaire comprenant 350 tours de fils. Un galvanomètre Rowland-d'Arsonval, dont la courbe d'étalonnage était exactement connue, était employé comme balistique pour la détermination des courbes d'hystérésis. Ce galvanomètre fut remplacé, dans la suite, par un appareil de Nadler du type à aiguille astatique suspendue, muni d'un écran en fer laminé pour éviter les perturbations magnétiques extérieures.

L'une des difficultés principales rencontrées par les auteurs dans cette étude a été l'élimination des erreurs dues à la viscosité magnétique. Le phénomène introduit dans la méthode du tracé de la courbe d'hystérésis échelon par échelon une erreur dépendant du nombre des échelons. Les auteurs se sont aperçus, dans la suite, que l'induction maxima déterminée par cette méthode ne concorde pas avec celle obtenue par la méthode des inversions. Les erreurs dues à la viscosité peuvent être éliminées par la modification suivante de la méthode (fig. 1). Le primaire

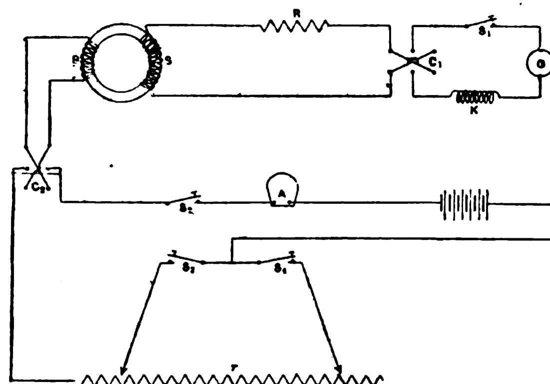


Fig. 1.

de l'anneau à essayer P est relié, par l'intermédiaire de l'inverseur C_2 et de l'interrupteur unipolaire S_2, à la batterie d'accumulateurs et à l'ampèremètre A. La batterie d'accumulateurs est connectée à un rhéostat à contact glissant *r* par l'intermédiaire des deux interrupteurs S_3 et S_4 munis de conducteurs souples que l'on peut fixer au rhéostat en deux points quelconques. Le secondaire de l'anneau d'essai est relié, à travers la résistance R_1, l'inverseur C_1 et la bobine K, au galvanomètre G. La modification apportée par les auteurs réside dans la façon de procéder. S_3 est relié au rhéostat de telle façon que le courant primaire soit suffisant pour produire la saturation. S_4 est alors relié à un point du rhéostat tel que, quand S_3 est ouvert, le courant primaire qui tend à passer corresponde à une valeur déterminée du flux inférieur au flux de saturation. A la fin de toute observation, les interrupteurs doivent être dans les positions suivantes : S_1 fermé, S_2 fermé, S_3 ouvert, S_4 fermé. Pour l'observation suivante on procède comme suit :

On ouvre S_1. On règle S_4 pour le courant primaire correspondant à un champ inférieur à celui de l'observation précédente. On ferme S_3, et l'on amène le fer à la saturation. On ferme S_1. Finalement on ouvre S_3 et l'on observe la déviation du galvanomètre. Celle-ci indique la modification d'induction à partir du point de saturation jusqu'à un champ quelconque plus faible. Pour les valeurs de la saturation comprises entre l'aimantation résiduelle et la saturation négative,

on procède comme suit : on ouvre S_1 ; on règle S_4 pour le courant primaire suivant que l'on veut obtenir. On inverse C_2 et on ferme S_3, amenant aussi le fer au point de saturation négative. On ferme S_1, puis S_2 et l'on observe la déviation du galvanomètre.

La courbe I (fig. 2) n'a pas été obtenue par

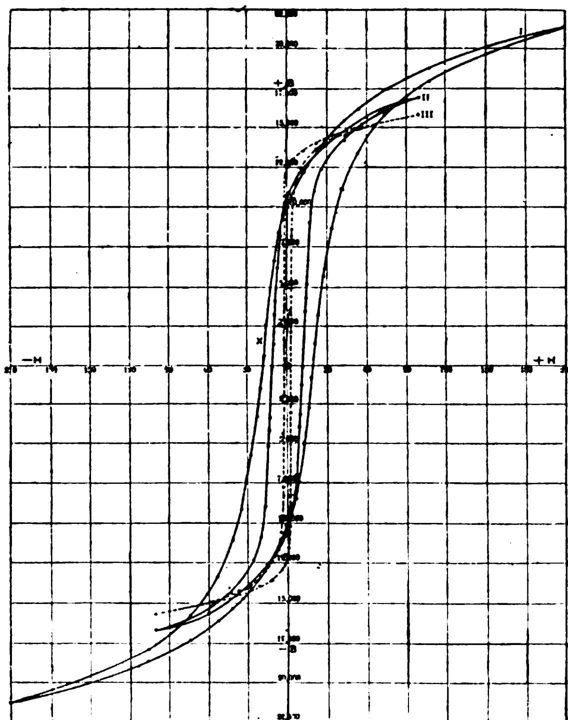


Fig. 2.

cette méthode. Les valeurs de B sont probablement de quelques centièmes trop faibles, mais les courbes présentent plusieurs propriétés remarquables. La force coercitive est de 18 dynes, et l'aimantation résiduelle est de 10 000 : cette valeur est un peu plus élevée quand l'erreur due à la viscosité magnétique est éliminée. Il semble qu'un champ de 110 dynes ne suffise pas pour saturer le fer, quoiqu'il produise une induction de 21 250.

On sait que l'échauffement provoque le dégagement de l'hydrogène du fer électrolytique. L'anneau d'essais fut chauffé pendant plusieurs heures à une température de 200°, après quoi l'on fit de nouveaux essais magnétiques. Ceux-ci donnent une courbe tout à fait identique à la précédente, montrant que ce n'est pas l'hydrogène en lui-même qui confère au fer électrolytique des propriétés magnétiques, ou bien que la quantité d'hydrogène dégagée n'est pas suffisante pour altérer matériellement les mesures magnétiques.

L'anneau fut débobiné, fut placé dans l'oxyde de magnésium et chauffé pendant 8 heures à 1 200 degrés environ. Une faible portion de l'anneau ayant été abîmée dans ce traitement, il fallut le tourner à nouveau et choisir des enroulements différents. L'anneau fut trouvé beaucoup plus mou qu'auparavant, et les valeurs de l'induction magnétique obtenues par la méthode d'échelons progressifs furent de 17 % inférieures aux valeurs obtenues par la méthode des inversions. Ce fait était dû à la viscosité magnétique, et l'on employa la méthode balistique modifiée pour éliminer l'erreur : la courbe ainsi obtenue (III) est représentée en trait interrompu sur la figure 2. On voit, en comparant cette courbe à la précédente, qu'une modification profonde est produite par un échauffement à 1 200°. La force coercitive est d'environ 2,5 dynes ; l'aimantation résiduelle est de 12 500 environ. Un second échauffement de l'anneau à 1 200° n'a pas produit de modification appréciable dans les propriétés magnétiques.

Un autre anneau fut préparé au moyen d'une solution maintenue beaucoup plus neutre que dans le cas précédent : le dépôt était plus dur et plus cassant, et la structure cristalline était plus fine. On mit sur cet anneau 408 tours primaires et 350 tours secondaires. La courbe II fut tracée au moyen de la méthode modifiée. Un champ de 100 dynes produit une induction maxima de 15 750 et une aimantation résiduelle de 10 300. La force coercitive est de 11 dynes.

Les auteurs terminent en indiquant que d'autres expériences sont en cours sur plusieurs échantillons de différentes formes.

R. R.

Théorie des alliages magnétiques du manganèse. — **Ch. Ed. Guillaume.** — *Société internationale des Electriciens*, juin 1906.

L'auteur a étudié les alliages magnétiques d'Heusler, composés de manganèse, de cuivre et d'aluminium. Il rappelle que les métaux ferromagnétiques ne le sont pas à toutes les températures ; les transformations qu'ils éprouvent, à des températures déterminées, les font passer de l'état ferro-magnétique à l'état faiblement ma-

gnétique ou inversement. On sait que la température de transformation du fer peut être abaissée d'une façon considérable par une adjonction convenable de chrome, de carbone, de manganèse ou de nickel, à tel point qu'il reste, à la température ordinaire, à l'état γ où il est d'une très grande ténacité. Le relèvement de la température de transformation est plus rare, quoique existant dans les alliages de fer et de nickel.

Or le manganèse et le chrome sont réellement de nature magnétique, mais leur température de transformation est située trop bas pour qu'on ait pu l'atteindre. Les propriétés magnétiques du manganèse pourraient apparaître si sa température de transformation était suffisamment remontée par sa combinaison avec des métaux appropriés. Or l'aluminium et l'étain, qui font partie des alliages magnétiques au manganèse, forment avec l'or, l'antimoine ou le sodium des alliages à température de fusion plus élevée que celle des constituants. Cette propriété de relèvement des températures de pression se retrouverait pour le magnétisme et serait alors une propriété générale d'élévation des températures de transformation.

GÉNÉRATION ET TRANSFORMATION

Effet des gaz d'échappement des moteurs à gaz sur différents métaux. — *Elektrotechnik und Maschinenbau*, 8 juillet 1906.

Des expériences ont été faites par le constructeur J. Pintsch sur des plaques d'essais de différents métaux purs et alliages ayant 200 × 200 millimètres de surface et 2 à 4 millimètres d'épaisseur : ces plaques étaient placées directement dans le pot d'échappement d'un moteur à gaz de telle sorte qu'elles fussent partout en contact avec les gaz d'échappement. La machine travaillait avec du gaz à 800 ou 900 calories par mètre cube : la température dans le pot d'échappement était de 370° ; la durée de l'essai fut de trois mois avec une durée journalière de fonctionnement de 11 heures. Les expériences ont montré que le bronze contenant de l'étain est le plus attaqué, et que le cuivre est fortement attaqué aussi. Les métaux qui résistent le mieux sont le nickel et le laiton, ce dernier d'autant mieux que la teneur en zinc est plus élevée. L'acier-nickel souffre moins que la fonte, et d'autant moins que la teneur en nickel est plus considérable

Quand le refroidissement de la machine est bon, il ne se produit pas de températures aussi élevées que celle indiquée, mais les températures élevées sont fréquentes et le seront sans doute de plus en plus dans l'avenir, particulièrement avec l'emploi de turbines à gaz ; l'acier-nickel serait alors le meilleur métal à employer. D'après les expériences, les pertes de poids des plaques d'essais, rapportées à une surface de un décimètre carré, se sont élevées aux chiffres suivants (en grammes) :

Tôle de laiton (60 de cuivre, 40 de zinc).	2,9
— cuivre.	20,8
— nickel.	2,8
— acier-nickel (26 °/₀ Ni).	4,6
— — (6 °/₀ Ni).	5,9
Fonte	6,9
Bronze coulé (88 Cu, 12 Sn).	116,7
Tôle de laiton (72 Cu, 28 Zn).	3,4

On voit que, pour les pièces de moteurs à gaz soumises à l'action des gaz d'échappement et pour lesquelles on ne peut pas employer la fonte, il faut avoir recours à l'acier-nickel, car les laitons perdent rapidement leur rigidité aux températures élevées. Les alliages contenant de l'étain doivent être exclus. Des expériences détaillées faites sur la fonte coulée ont montré que la croûte existant après la fonte protège efficacement le métal : d'ailleurs la fonte, même travaillée, est peu attaquée.

B. L.

Sur l'évaluation de l'élévation de température des induits. — **A. Press.** — *Electrical World*, 30 juin 1906.

Les méthodes généralement employées pour évaluer la température de l'induit d'une machine électrique donnent, dans un grand nombre de cas, des résultats qui diffèrent de plus de 300 °/₀ du chiffre exact. On ne tient presque jamais compte, dans l'évaluation de l'élévation de température, des étincelles au collecteur : en outre, les relations entre les watts par décimètre carré dépensés sur le collecteur par unité de vitesse périphérique et les watts dépensés sur l'induit par unité de surface et de vitesse périphérique semblent être généralement fausses.

Si l'élévation de température du collecteur est forte et celle de l'armature faible, une quantité appréciable de l'énergie dépensée sur le collecteur sera radiée par l'induit, en vertu de la con-

ductibilité calorifique élevée du cuivre reliant les lames du collecteur aux extrémités des bobines de l'induit. En tenant compte de cet effet dans la théorie de la distribution de la chaleur, on peut évaluer le nombre de watts admissibles par décimètre carré en fonction de l'élévation de température possible de l'induit et du collecteur à certaines vitesses périphériques.

Soient :

W_c, les watts au collecteur.

C, la constante de radiation du collecteur.

W_a, les watts à l'induit.

A, la constante de radiation de l'induit.

B, une constante dépendant de la conductibilité du cuivre.

S_n, la section droite moyenne des conducteurs induits.

T_c, l'élévation de température du collecteur,

T_a, l'élévation de température de l'induit.

D, le diamètre de l'induit.

D_c, le diamètre du collecteur.

$l+2L$, la longueur de la surface totale de l'induit, c'est-à-dire y compris la longueur axiale des connexions des bobines.

l_c, la longueur du collecteur.

R, le nombre de tours par minute.

Il est évident que l'énergie non radiée directement par le collecteur doit être radiée par conduction par la surface de l'induit. Analytiquement, on a donc :

$$W_c = C\pi^2 (D_c)^2 l_c RT_c + BS_n (V_c - T_a)$$
$$A\pi^2 D^2 lRT_a = W_a + BS_n (T_c - T_a)$$

ou

$$W_c = CT_c + B (T_c - T_a)$$
$$W_a = AT_a - B (T_c - T_a).$$

On obtient alors, pour la valeur du rapport T_c/T_a, l'expression suivante :

$$\frac{T_c}{T_a} = \frac{\frac{(A+B)}{(B+C)} \frac{W_c}{W_a} + \frac{B}{C+B}}{\frac{B}{(B+C)} \cdot \frac{W_c}{W_a} + 1}.$$

Si B est petit en comparaison de A ou C, on a :

$$\frac{T_c}{T_a} = \frac{A}{C} \cdot \frac{\text{Watts par unité de surface de collecteur par unité de vitesse périphérique}}{\text{Watts par unité de surface d'induit par unité de vitesse périphérique}}$$

ou

$$\frac{A}{C} \cdot \frac{T_a}{T_c} = \frac{W_a}{W_c} \left(\frac{D_c}{D}\right)^2 \frac{\text{longueur du collecteur}}{\text{longueur totale de l'induit}}.$$

En portant en ordonnées les valeurs de $\frac{A_a}{C} \frac{T_a}{T_c}$ calculées d'après l'expression $\frac{W_a}{W_c} \left(\frac{D_c}{D}\right)^2 \frac{l_c}{l+2L}$, et en abscisses les valeurs de A, on obtient une courbe utile.

R. R.

Enroulements induits série-parallèle avec connexions équipotentielles. — **E. Arnold.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 5 juillet 1906.

Les machines multipolaires de forte puissance doivent, quand cela est possible, être munies d'enroulements induits en barres. Les enroulements de ce type sont en effet plus simples et plus parfaits, au point de vue mécanique, que les enroulements en fils. Les barres individuelles peuvent être plus facilement et plus soigneusement isolées et sont plus facilement remplaçables en cas de réparations.

L'intensité du courant dans une branche d'induit est, d'une façon générale, en appelant $2a$ le nombre des branches de l'induit et J_a le courant total dans l'induit, $i_a = J_a/2a$. Pour un enroulement en barres, il faut que i_a soit supérieur à 60 et inférieur à 200 ampères, et, si possible, supérieur à 100 ampères. Mais il peut arriver que l'intensité de courant d'une branche de l'induit, pour un nombre de pôles donné $2p$ et un enroulement imbriqué avec $2a = 2p$ branches soit trop faible, et que le nombre de fils soit trop grand pour que l'on puisse établir l'enroulement en barres. Si l'on cherche à adopter un enroulement ondulé, avec seulement deux branches, on est conduit à une intensité de courant trop élevée pour chaque branche ou à un nombre trop faible de lames de collecteur. Dans un tel cas, on peut recourir utilement à l'enroulement série-parallèle avec un nombre de branches de l'induit supérieur à 2 et inférieur à $2p$: cette solution permet de résoudre toutes les difficultés.

L'enroulement série-parallèle possède l'avantage que le nombre des branches de l'induit peut être choisi indépendamment du nombre de pôles comme nombre pair quelconque et conduit, dans tous les cas, à une section des barres induites

avantageuse pour l'exécution et le dimensionnement de la machine.

L'auteur a employé l'enroulement série-parallèle depuis 1891 pour des machines tétrapolaires et hexapolaires : depuis lors, ce type d'enroulement a été fréquemment adopté par plusieurs constructeurs. On a pu recueillir un certain nombre de résultats d'expérience intéressants, d'après lesquels il est possible d'établir les règles à observer dans l'établissement d'un enroulement série-parallèle.

En premier lieu, l'expérience a appris qu'il est nécessaire de munir de connexions équipotentielles les enroulements série-parallèle, si l'on veut établir une machine qui ne soit pas trop sensible au point de vue du calage des balais. Plusieurs machines établies sans jonctions équipotentielles et présentant une commutation défectueuse ont pu être améliorées par l'adjonction de connexions équipotentielles et ont présenté, après cette modification, un fonctionnement excellent. On a quelquefois observé le fait que les connexions équipotentielles s'échauffaient d'une façon anormale, mais ce fait était toujours dû à un emploi défectueux de ces connexions. Dans l'établissement d'un enroulement série-parallèle, il y a lieu d'apporter une grande attention à ce que toutes les branches de l'induit soient aussi égales que possible au même instant, au point de vue des forces électromotrices induites.

Action des connexions équipotentielles dans les enroulements série-parallèle.

L'influence favorable des connexions équipotentielles sur la commutation provient de deux causes. En premier lieu, ces connexions assurent une répartition uniforme du courant aux différentes lignes de balais ; en second lieu elles offrent aux courants de court-circuit supplémentaires un chemin non inductif parallèle aux balais et déchargent ainsi les balais. Dans l'enroulement en série-parallèle, tous les balais de même nom sont, il est vrai, reliés entre eux par les bobines court-circuitées, mais les connexions équipotentielles offrent au courant un chemin de résistance plus faible, puisqu'elles sont à peu près dépourvues d'inductance : en outre, quand le balai est en contact avec moins de a lames, tous les balais de même nom ne sont pas directement reliés ensemble par une bobine court-circuitée. Des tracés oscillographiques montrent qu'une partie importante des courants supplémentaires passe par les jonctions équipotentielles. En outre, les connexions équipotentielles exercent l'action suivante :

1° En cas de résistances de passage inégales sous les balais, un courant d'équilibre peut passer à travers les connexions équipotentielles non inductives ;

2° Les courants supplémentaires de court-circuit passent en partie par les jonctions équipotentielles, ce qui décharge les balais ;

3° Les courants d'égalisation existant par suite de dissymétrie du champ agissent pour uniformiser cette dissymétrie, et l'inégalité des forces exercées par l'inducteur sur l'induit est diminuée ;

4° Les différences de potentiel entre lames voisines sont réparties plus uniformément sur la périphérie du collecteur.

Pas du potentiel.

Dans ce qui suit, l'auteur emploie les notations suivantes :

k, nombre de lames de collecteur ;

z, nombre d'encoches ;

u_n, nombre des côtés de bobines dans une encoche ;

a, demi-nombre de branches d'induit ;

p, demi-nombre de pôles ;

y_k, pas du collecteur ;

y_p, pas du potentiel.

Comme l'a montré l'auteur en 1902, le pas équipotentiel d'un enroulement série-parallèle est

$$y_p = xy_k \pm x\frac{a}{p} \qquad (1)$$

où

$$y_k = \frac{k}{p} \mp \frac{a}{p} \quad \text{ou} \quad k = py_k \pm a. \qquad (2)$$

D'une façon générale, il faut lier a points en un système et, pour relier les points, il faut au moins $(a - 1)$ pas de potentiel, et chaque système de a pas de potentiel forme une figure fermée, c'est-à-dire que l'on a :

$$y_{p1} + y_{p2} + y_{p3} + \cdots + y_{pa} = k.$$

Si l'on écrit les équations (1) et (2) sous la forme suivante :

$$y_p = x\left(y_k \pm \frac{a}{p}\right)$$

$$k = p\left(y_k \pm \frac{a}{p}\right),$$

on voit que l'on doit avoir :

$$x_1 + x_2 + x_3 - \cdots + x_a = p.$$

Les valeurs de x_1 à x_a des a pas du potentiel peuvent être différents entre eux ; les pas du potentiel sont alors inégaux.

Quand $x\frac{a}{p}$ n'est pas un nombre entier, y_p n'est pas non plus un nombre entier : il est toutefois avantageux de choisir y_p entier, même quand $x\frac{a}{p}$ n'est pas entier. Pour que cette valeur entière de y_p diffère aussi peu que possible de la valeur calculée, il faut que la valeur de x soit aussi voisine que possible de celle de p/a. Cette condition est remplie quand on arrondit à l'unité $x\frac{a}{p}$, et l'on obtient d'après la formule (2) le nombre entier pour y_p

$$y_p = x \cdot y_k \pm 1. \qquad (3)$$

Pour ces pas, on a aussi la condition :

$$y_{p1} + y_{p2} + y_{p3} + \cdots + y_{pa} = k = p \cdot y_k \pm a.$$

Du fait que, dans un enroulement série-parallèle, a points sont reliés au même système, on déduit pour chaque enroulement la condition principale générale suivante :

$$k/a = \text{nombre entier}.$$

Si l'on considère les circuits formés par deux systèmes d'équilibre quelconques et les bobines comprises entre les points de jonction, on voit que chacun de ces circuits doit contenir un même nombre de bobines opposées : cela ne peut avoir lieu que si k/a est un nombre entier. Soit g le plus grand commun diviseur de p et a : a/g est le plus petit nombre des fermetures de l'enroulement pour lequel on puisse prendre pour k/a un nombre entier. Si p/a est un nombre entier, la condition peut être remplie pour un enroulement simplement fermé.

Il est recommandable d'adopter un nombre de fermetures aussi petit que possible. Le tableau suivant indique, pour différentes conditions d'enroulement, le plus petit nombre de fermetures, par lequel k/a peut être pris égal à un nombre entier.

Pour	$p=4$	$a=2$	enroulement fermé	1 fois
—	$p=4$	$a=3$	—	3 —
—	$p=6$	$a=3$	—	1 —
—	$p=6$	$a=4$	—	2 —
Pour	$p=6$	$a=6$	enroulement fermé	1 fois
—	$p=10$	$a=3$	—	3 —
—	$p=10$	$a=4$	—	2 —
—	$p=12$	$a=4$	—	1 —
—	$p=12$	$a=8$	—	2 —
—	$p=12$	$a=9$	—	3 —

Connexions équipotentielles pour enroulements uniformément répartis.

L'enroulement est uniformément réparti à la périphérie de l'induit dans les induits lisses et dans les induits dentés avec un côté de bobine ou deux côtés de bobine superposés par encoche. On peut faire les distinctions suivantes :

1° p/a est un nombre entier.

Pour cet enroulement, on a

$$x = p/a \quad \text{et} \quad x(a/p) = 1.$$

Le pas de potentiel est, d'après l'équation (1)

$$y_p = x \cdot y_k \pm x\frac{a}{p} = \frac{p}{a} y_k \pm 1 = \frac{k}{a}.$$

2° p/a n'est pas un nombre entier.

Pour cet enroulement, $x(a/p)$ n'est pas un nombre entier. On a

$$y_p = x \cdot y_k \pm 1.$$

La différence entre le pas y_p et la valeur rigoureuse, c'est-à-dire l'erreur de pas est

$$\alpha_x = \pm\left(1 - x\frac{a}{p}\right) \qquad (4)$$

α_x est mesuré en lames de collecteur et correspond à un angle égal à $2\pi\alpha_x/k$. En degrés électriques, c'est-à-dire sur une machine bipolaire, on a :

$$\alpha_x^{\circ} = a\frac{360}{k}\alpha_x. \qquad (5)$$

La formule est d'abord applicable pour $a \leqslant p$. Si l'on a $a > p$, on a, pour $(a - p)$ pas du potentiel, $x = 0$ et $y_p = 0$. Donc quand $a > p$, il faut, pour le calcul de α_x dans la formule précédente, poser $a = p$.

Si p et a ont un plus grand commun diviseur g, p/g et un nombre entier ; si, dans ce cas, on relie seulement g points à un système d'équilibre, on obtient des connexions sans erreur. Le pas du potentiel est alors $y_p = k/g$.

A ce groupe appartiennent aussi les enroulements pour lesquels a/p est un nombre entier. Dans les enroulements, le plus grand commun diviseur de p et a est p, et l'on peut, sans erreurs, relier p points à un système d'équilibre.

Pour ces connexions, le pas du potentiel est $y_p = k/p$.

En outre, en quelques points de la périphérie de l'induit, q ($\leqslant a/p$) conducteurs voisins doivent être reliés ensemble, quand l'erreur

$$\alpha_x{}^\circ = p\,\frac{360}{k}(q-1) \qquad (6)$$

n'est pas trop grande. $\alpha_x{}^\circ$ doit être inférieur à 3° environ.

(A suivre.) B. L.

Moteur série monophasé Siemens-Schuckert (*Fin*) (1). — **Richter**. — *Elektrotechnische Zeitschrift.*

IV. Rendement.

On a vu précédemment que, pour les mêmes pertes mais pour une puissance plus élevée, $L' = (1+u)L$, le rendement est

$$\eta' = \frac{1+u}{1+u\eta}\eta. \qquad (2_a)$$

Soit η le rendement du moteur série monophasé Siemens-Schuckert pour une différence de potentiel sinusoïdale aux bornes : le rendement du même moteur, fonctionnant sur courant continu, avec environ 41 °/₀ de tours d'excitation en plus est

$$\eta' = \frac{1,28}{1+0,28\eta}\eta$$

Or d'après les équations 14 et 14 *a* développées précédemment, on a :

$$1+u = \frac{1}{0,785} = 1,28.$$

Pour $\eta = 80$ °/₀, on a $\eta' = 83,6$ °/₀. Le rendement du moteur monophasé est donc de 3,6 °/₀ inférieur à celui du moteur à courant continu (ayant 41 °/₀ d'ampère-tours d'excitation en plus). On ne peut malheureusement rien changer à cet état de choses, quelle que soit la fréquence du courant monophasé.

Avant de comparer le rendement du moteur série avec celui du moteur à répulsion compensé, l'auteur décrit un mode de bobinage qui doit abaisser les pertes totales du moteur. La figure 12 représente l'enroulement ordinaire du stator pour un moteur bipolaire à 12 encoches. La partie des dents qui forment le pôle principal est hachurée. L'enroulement qui doit compenser le flux de l'induit est représenté par les gros traits ; les traits fins représentent l'enroulement excitateur embrassant cinq dents. Les bornes K_1 et K_2 sont

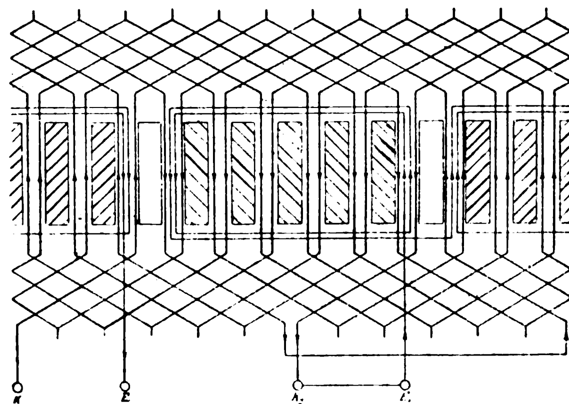


Fig. 12.

reliées aux extrémités de l'enroulement compensateur, et E_1 et E_2 aux extrémités de l'enroulement excitateur. Sur la figure, on a représenté la direction du courant pour une rotation de l'induit de la gauche vers la droite. Comme on le voit, les conducteurs dans les encoches situées à droite des pôles principaux sont parcourus par le courant en sens opposés : on peut donc, pour une disposition convenable de l'enroulement, négliger ces conducteurs sans que la répartition des forces magnétomotrices du moteur soit modifiée.

La figure 13 représente un tel enroulement.

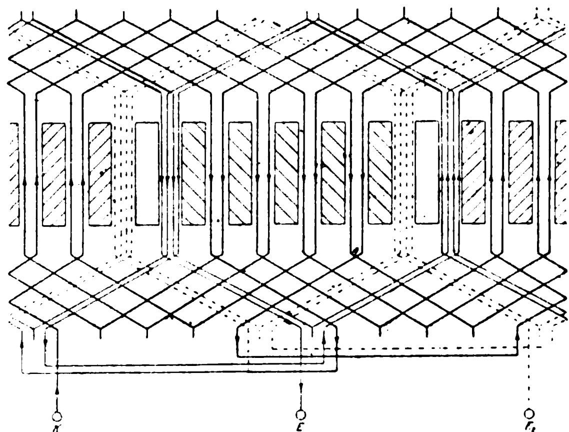


Fig. 13.

La portion de l'enroulement servant uniquement à la compensation du flux de l'induit est repré-

(1) Voir *Éclairage Électrique*, tome XLVIII, 28 juillet 1906, page 149.

sentée en traits forts ; les traits fins et minces représentent la portion de l'enroulement qui, lors de la rotation de l'induit de gauche à droite, sert en partie à compenser l'induit et en partie à produire le flux d'excitation : le courant entre par la borne K et sort par la borne E. Pour l'autre sens de rotation de l'induit, de droite à gauche, on met en circuit, au lieu de la portion d'enroulement figurée en traits minces et pleins, la portion figurée en traits minces et interrompus, portion que l'on peut laisser absolument de côté si le moteur ne doit tourner que dans un sens. Le courant entre alors par la borne K et sort par la borne E_2. Le poids total de cuivre est le même dans les enroulements des figures 13 et 14. Le nombre de tours est le même et la longueur moyenne d'un tour est la même.

Si l'on compare le rendement du moteur série Siemens-Schuckert avec celui du moteur à répulsion compensé, on doit supposer la même induction maxima et la même intensité de courant dans l'induit. Si l'on admet, à l'avantage du moteur compensé, que la saturation du fer est telle que la force magnétomotrice triangulaire, dans le moteur compensé, produit un champ présentant une répartition sinusoïdale, le rendement du moteur série est, d'après les équations (2*a*) et (1*c*), en appelant η' le rendement du moteur à répulsion compensé :

$$\eta = \frac{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{b}{\tau}}{1 + \left(\frac{\pi}{2}\frac{b}{\tau} - 1\right)\eta'}\eta'. \qquad (17)$$

Pour $\eta' = 80\ \%$, et pour $b/\tau = 6/7 = 8{,}857$, on a $\eta = 84{,}4\ \%$.

On obtient donc, avec le moteur série Siemens-Schuckert, un rendement de 4,4 % plus élevé. D'autre part, comme on l'a vu, le moteur à courant continu compensé a un rendement de 3,6 % supérieur à celui du moteur série monophasé Siemens-Schuckert.

Il reste à voir si, dans les moteurs ainsi comparés, les pertes sont égales quand les inductions maxima du flux excitateur et les intensités efficaces du courant dans l'induit sont les mêmes. Les induits des deux moteurs sont supposés identiques : les pertes Joule dans les induits sont donc égales pour des courants de travail égaux (dans le moteur compensé, le courant de travail est celui qui passe par les balais court-circuités). De même, les pertes Joule dues aux courants wattés dans les enroulements statoriques k_1 et k_2 du moteur série de la figure 13 et dans l'enroulement statorique k du moteur à répulsion compensé sont égales puisque les courants wattés dans ces enroulements sont égaux et que la résistance des enroulements k_1 et k_2 du moteur série est égale à celle de l'enroulement k du moteur compensé. Le courant magnétisant, qui doit produire le flux transversal, est plus grand pour le moteur série dans le rapport du nombre de tours de l'enroulement k du moteur à répulsion compensé au nombre de tours de l'enroulement k_1 du moteur série : les pertes Joule dues au courant magnétisant sont donc plus grandes, dans le même rapport, pour ce moteur. Soient φ les pertes dans le cuivre du courant magnétisant servant à produire le flux transversal dans le moteur à répulsion compensé, n le nombre de tours de l'enroulement k pour ce même moteur (égal au nombre de tours d'enroulement de l'induit dans le moteur série, puisque les enroulements des deux moteurs sont établis pour la même différence de potentiel), n_1 le nombre de tours de l'enroulement k_1 et n_2 le nombre de tours de l'enroulement k_2 dans le moteur série ($n = n_1 + n_2$) : les pertes dans le cuivre pour la production du flux transversal dans le moteur série sont

$$\frac{n}{n_1}\varphi = \frac{1}{1 - (n_2/n)}\varphi.$$

Or n_2/n n'est autre que le rapport du nombre de tours de l'enroulement excitateur et de l'enroulement induit dans le moteur série, c'est-à-dire 1/3 environ. Les pertes dans le cuivre du courant magnétisant pour la production du flux transversal sont donc, pour le moteur série

$$\frac{1}{1 - (1/3)}\varphi = 1{,}5\,\varphi.$$

Dans le moteur série, le flux d'excitation est produit en même temps, comme on l'a dit, par l'enroulement k_2. Dans le moteur à répulsion compensé, il est produit par l'induit. Ce dernier est donc, dans ce moteur, le siège du courant de travail J et du courant d'excitation i : ces deux courants, qui sont presque en phase, se compensent en partie et s'ajoutent en partie. Soit w la résistance de l'induit : les pertes totales dans le cuivre de l'induit pour le moteur compensé sont

$$\frac{w}{2}(J + i)^2 + \frac{w}{2}(J - i)^2 = wJ^2 + wi^2.$$

Les pertes dans le cuivre de l'induit sont donc supérieures de la quantité wi^2 aux pertes dans le moteur série. A vitesse normale, dans le moteur à répulsion compensé, le flux transversal est égal au flux excitateur et les pertes Joule des courants wattés dans l'induit et dans l'enroulement compensateur sont à peu près égales (elles sont plutôt plus faibles dans le stator parce qu'on dispose de plus de place) : les pertes Joule du courant magnétisant dans l'enroulement k doivent donc être égales à celles que produit dans l'induit le courant excitateur i. La somme des pertes dans le cuivre pour la production du flux transversal et du flux d'excitation pour le moteur à répulsion compensé est donc au moins $2v$. Les pertes Joule produites par les courants wattés étant égales dans les deux moteurs, mais le flux d'excitation étant produit en même temps par le courant de travail dans l'enroulement k_2, on voit que les pertes Joule totales dans le moteur à répulsion compensé sont d'environ $(2-1,5)v = 0,5\,v$ supérieures aux pertes Joule dans le moteur série.

En ce qui concerne les pertes dans le fer, on a, dans les deux moteurs, deux flux décalés d'environ 90° dans l'espace et dans le temps : il se produit donc, à une vitesse déterminée, un champ tournant plus ou moins parfait. Dans le moteur série, quand le fer n'est pas saturé, l'un des flux est de forme rectangulaire et l'autre flux est de forme trapézoïdale. Dans le moteur compensé, les deux flux sont de forme triangulaire et lorsque le fer est saturé, s'approchent beaucoup de la forme sinusoïdale. Le champ tournant du moteur à répulsion compensé est donc plus parfait que celui du moteur série. Les pertes dans le fer sont donc un peu plus faibles, au voisinage du synchronisme, dans le moteur à répulsion compensé. La différence est difficile à déterminer ; elle ne doit pas être importante, car les pertes dans le fer de l'induit sont relativement faibles, même quand il n'existe pas de flux transversal.

Les pertes par frottements sont plus élevées dans le moteur compensé, à cause du plus grand nombre de balais frottant sur le collecteur : cette augmentation de frottements n'est pas négligeable et peut même être assez importante car les pertes par frottements des balais sont relativement élevées dans les moteurs monophasés, par suite du fait que les vitesses périphériques du collecteur doivent être aussi élevées que possible pour une bonne commutation et un faible échauffement du collecteur.

Les pertes de commutation sont plutôt plus faibles dans le moteur série que dans le moteur à répulsion compensé, parce que, dans ce dernier, il se produit aussi des pertes de commutation aux balais d'excitation.

Si l'on rassemble ce qui précède sur les pertes dans les deux moteurs on voit que :

1° Les pertes dans le cuivre sont plus élevées dans le moteur à répulsion compensé que dans le moteur série.

2° Les pertes dans le fer sont un peu plus faibles dans le moteur à répulsion compensé par suite de l'existence d'un champ tournant plus parfait.

3° Les pertes par frottement sont plus élevées dans le moteur à répulsion compensé, à cause du frottement des balais supplémentaires.

On peut donc admettre que, pour la même induction maxima et la même intensité efficace du courant de travail, les pertes totales sont plutôt plus faibles dans le moteur série que dans le moteur à répulsion compensé. Mais, dans l'hypothèse d'une même induction maxima et d'une même intensité efficace du courant moteur, le rapport des puissances des deux moteurs et celui de leurs rendements sont donnés par les équations 16 et 17 : on peut donc affirmer que le moteur Siemens-Schuckert a certainement un rendement supérieur de plusieurs centièmes à celui du moteur à répulsion compensé.

Le moteur série offre, en outre, sur le moteur à répulsion compensé, l'avantage que le nombre des pôles peut être déterminé arbitrairement, de façon à obtenir les valeurs les plus favorables pour le diamètre extérieur du moteur, le rendement et la commutation.

V. Facteur de puissance.

La différence de potentiel aux bornes de l'enroulement excitateur qui, avec la tension de dispersion, forme la composante inductive de la différence de potentiel du moteur est minima pour un moteur à enroulement excitateur non réparti, et à arc polaire aussi grand que possible, car, pour le même flux d'excitation, le nombre de tours de l'enroulement excitateur est minimum. Le facteur de puissance est d'autant meilleur que

la vitesse de rotation du moteur est plus grande et que la fréquence du courant alternatif est plus faible. Pour la plupart des cas de la pratique, le facteur de puissance est assez élevé ; même pour une fréquence de 50 périodes, on peut atteindre un facteur de puissance de 0,9. Le moteur Siemens-Schuckert décrit antérieurement présente un facteur de puissance égal à l'unité pour une fréquence de 50 périodes et des vitesses de rotation comprises entre 600 et 1200 tours. Ce résultat est surprenant et mérite d'être étudié en détail. Les connexions du moteur étaient établies suivant le schéma de la figure 14 : l'enroulement en court-circuit K ne sert qu'à la

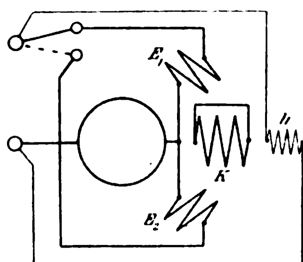


Fig. 14.

compensation du flux de l'induit, tandis que les enroulements E_1 et E_2 annulent en partie le reste de ce flux, l'un des enroulements pour le sens de rotation de gauche, à droite, et l'autre enroulement pour le sens de rotation opposé. L'enroulement *h* produit un flux transversal : celui-ci engendre dans la bobine de l'induit court-circuitée par les balais une f. é. m. de rotation qui compense la f. é. m. induite statiquement. Le moteur a été construit dans le premier semestre 1904 et n'était pas encore muni de l'un des dispositifs décrits plus haut pour la neutralisation de la tension de commutation à toutes les charges. Les courbes de la vitesse de rotation, du rendement et du facteur de puissance en fonction du couple pour une différence de potentiel invariable de 110 volts montrent que le facteur de puissance est égal à l'unité pour des valeurs du couple comprises entre 15 et 40 kilogrammètres, le rendement étant maximum pour un couple de 25 kilogrammètres et atteignant alors 76 % : la vitesse correspondant à ce couple de 25 kilogrammètres est de 930 tours par minute. Sur les courbes du facteur de puissance, du rendement et de la vitesse de rotation en fonction de la différence de potentiel aux bornes du moteur, entre 60 et 120 volts, le couple restant constant et égal à 17 kilogrammètres, on voit également que le facteur de puissance a pour valeur constante l'unité. Ce phénomène s'explique par la réaction des tours de l'induit court-circuités par les balais. Quand l'enroulement *h* (fig. 14) est dimensionné de telle façon que la f. é. m. induite statiquement soit annulée seulement en partie, le reste produit le courant de court-circuit J_k qui décale le courant moteur J dans la direction de la différence de potentiel aux bornes. On acquérerait cette augmentation du facteur de puissance au prix d'une diminution de rendement si le flux transversal, qui est presque en phase avec le courant de court-circuit, n'exerçait pas de couple sur les tours de l'induit court-circuités. Pour montrer que l'augmentation du facteur de puissance n'était pas obtenue au détriment du rendement dans le moteur d'essais, on a tracé les courbes de rendement et de facteur de puissance en fonction de la différence de potentiel entre les extrémités de l'enroulement *h* pour une différence de potentiel invariable aux bornes et pour un couple invariable (21,5 kilogrammètres). La compensation complète de la f. é. m. induite statiquement se produit pour une différence de potentiel de 170 volts environ ; pour une différence de potentiel plus faible, le rendement reste presque exactement le même, tandis que le facteur de puissance augmente pour atteindre l'unité ; pour une différence de potentiel plus élevée, le facteur de puissance et le rendement diminuent tous deux. Pour 170 volts à l'enroulement auxiliaire, le moteur fonctionnait sans aucune étincelle ; pour 110 volts il y avait quelques étincelles ; pour 40 volts il y avait un peu plus d'étincelles qu'on ne l'admet en général dans un moteur de traction. Le rendement de 76 % est dû à ce que ce moteur d'essais contenait d'autres enroulements inutilisés ; l'utilisation complète de la place disponible aurait permis d'obtenir au moins 80 %.

Le résultat de l'augmentation du facteur de puissance pour une incomplète compensation de la f. é. m. induite statiquement est intéressant, mais il ne faut pas lui attribuer une grande importance pratique. Dans le moteur d'essais, lorsque la f. é. m. induite statiquement est entièrement compensée (pour 170 volts à l'enroulement auxiliaire), la valeur du facteur de puissance est encore 0,92.

Dans d'autres projets de moteurs série monophasés pour 50 périodes également, le facteur de puissance est supérieur à l'unité. Bien que, dans les cas de très faibles vitesses de rotation et d'entrefers relativement grands, le facteur de puissance doive s'abaisser au-dessous de 0,9, il sera toujours suffisamment élevé pour qu'il soit inutile de recourir à des artifices particuliers pour l'élever. C'est pourquoi, dans les moteurs Siemens-Schuckert, on ne compense pas la composante inductive de la tension quoique l'enroulement supplémentaire décrit à propos du démarrage permette d'élever le facteur de puissance à la valeur unité pour presque toutes les charges. La partie en circuit de l'enroulement supplémentaire n'est pas placée, comme précédemment, sous les pôles principaux, pour produire un couple utile, mais est placée dans le champ transversal, de façon à être le siège d'une f. é. m., induite par la rotation, susceptible d'annuler la composante inductive de la différence de potentiel aux bornes du moteur. La f. é. m. induite statiquement dans l'enroulement supplémentaire par la variation du flux excitateur est neutralisée par l'enroulement compensateur placé sur le stator. Pour changer le sens de rotation du moteur, on inverse le flux excitateur : l'enroulement produisant le flux transversal, l'enroulement induit et l'enroulement compensateur sont toujours parcourus dans le même sens par le courant, quel que soit le sens de rotation. Si le moteur ne doit tourner que dans un sens, on peut supprimer complètement l'enroulement d'excitation, l'enroulement supplémentaire de l'induit servant en même temps à produire le flux excitateur.

Si le flux transversal est produit par un enroulement shunt et si la différence de potentiel aux bornes de celui-ci est réglable, on peut neutraliser, en même temps que la f. é. m. induite statiquement dans les bobines court-circuitées, la composante inductive de la différence de potentiel du moteur pour presque toutes les charges.

Si l'on compare l'augmentation du facteur de puissance dans le moteur série Siemens-Schuckert avec celle obtenue dans le moteur à répulsion compensé, on arrive au résultat suivant :

Dans le moteur à répulsion compensé, la composante inductive de la tension peut être neutralisée pour une vitesse déterminée, abstraction faite de la dispersion : c'est vrai également si l'on emploie un transformateur série réglable comme l'ont fait Winter et Eichberg. S'il n'y avait pas de dispersion, cette vitesse coïnciderait avec celle pour laquelle la f. é. m. induite statiquement est neutralisée, mais comme la tension de dispersion représente une part très importante de la composante inductive de la tension, le facteur de puissance unité est atteint pour une vitesse plus élevée que la neutralisation de la f. é. m. induite statiquement dans l'enroulement induit court-circuité.

La neutralisation de la f. é. m. induite statiquement et celle de la composante inductive de la tension agissante ne se produisent donc pas à la même vitesse. Dans le moteur Siemens-Schuckert, ces deux conditions peuvent être obtenues simultanément, et, quand on emploie un réglage du flux transversal, cela est possible pour presque toutes les charges, chose impossible avec le moteur à répulsion compensé.

R. V.

Interrupteur pour bobines d'induction servant à la production de rayons Röntgen. — **Januszkiewicz.** — *Physikalische Zeitschrift*, 15 juin 1906.

Les interrupteurs de bobines d'induction servant pour les rayons Röntgen doivent pouvoir supporter des intensités de courant élevées (jusqu'à 20 ampères), doivent permettre de maintenir au-dessus d'un certain minimum le nombre d'interruptions de courant par unité de temps et doivent réaliser une fermeture du circuit aussi progressive que possible, et une ouverture brusque. Les interrupteurs électrolytiques remplissent complètement les deux premières conditions : en ce qui concerne la troisième, ils sont très mauvais et l'action nuisible des courants de fermeture est extrêmement importante. Au contraire, dans l'ancien trembleur à marteau de Neff, cette action nuisible est très réduite. Mais les interrupteurs basés sur ce principe ne permettent ni l'emploi d'intensités de courant élevées, ni la réalisation d'une grande fréquence, d'une part à cause de la détérioration des surfaces de contact, et d'autre part à cause de la longueur nécessaire de l'étincelle de rupture.

La pression du gaz environnant réduit d'une façon très sensible la longueur d'une étincelle : par exemple Volf a trouvé qu'entre la tension

explosive v en unités électrostatiques et la pression de l'air p en atmosphères il existe la relation $v = 107 . 2p + 79$. On peut donc réaliser un interrupteur à contact dans lequel la formation d'étincelles de rupture longues et violentes soit complètement évitée, en enfermant les parties oscillantes et les deux surfaces de contact dans un espace fermé où règne une pression de quelques atmosphères. Un tel appareil est facile à construire, puisqu'il suffit d'un récipient de 125 à 150 centimètres cubes de contenance en laiton de 1,5 à 2 millimètres d'épaisseur, pour contenir l'air sous pression.

B. L.

TRANSMISSION & DISTRIBUTION

***Sur les constantes à employer pour le calcul des câbles** (fin)* (1). —**Teichmüller et Humann.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 21 juin 1906.

Calcul d'après les résultats d'autres expérimentateurs. — L'étude publiée par Apt et Mauritius (2) contient un certain nombre d'indications sur les températures des conducteurs en cuivre et des enveloppes en plomb. Si l'on admet que les câbles étudiés par ces auteurs répondent aux conditions ordinaires de fabrication, on trouve les valeurs indiquées par le tableau VII.

TABLEAU VII

	J en Amp.	τ	ρ_τ	$\sigma_{k\tau}$	MOYENNE POUR $\sigma_{k\tau}$
$Q = 3 \times 10$ $D_{is} = 14,98$ $D'_i = 8,12$	3×65	8,2	0,0183	359	407
	85	20,0	8,0206	455	
$Q = 3 \times 185$ $D_{is} = 46,5$ $D'_i = 36,78$	3×355	7,2	0,0189	555	539
	400	10,0	0,0199	524	
$O = 3 \times 16$ $D_{is} = 30,6$ $D'_i = 13,35$	3×50	7,2	0,0172	678	464
	80	12,0	0,0189	401	
	90	14,5	0,0196	369	
	100	20,7	0,0206	406	

Les valeurs ainsi trouvées sont à peu près du même ordre de grandeur que les valeurs précédentes : cependant la différence des résultats obtenus sur des câbles de même groupe est surprenante : cette différence peut provenir de ce que les températures de l'enveloppe en plomb n'ont pas été déterminées avec beaucoup d'exactitude, la connaissance de ces températures n'ayant pas d'utilité pour les auteurs.

Essais sur des câbles à trois conducteurs torsadés pour haute tension. — Les auteurs ont fait ces essais de la même manière que sur les câbles à trois conducteurs à basse tension. Les résultats sont indiqués sur le tableau VIII.

TABLEAU VIII

	ÉPAISSEUR DE L'ISOLANT en mm.	J en Amp.	τ	ρ_τ	$\sigma_{k\tau}$	MOYENNE $\sigma_{k\tau}$
$Q = 3 \times 10$ $D_{is} = 27,1$ $D'_i = 11,8$	Cu/Cu	3×50	11,0	0,0176	630	544
	9,0	50	13,92	0,0180	541	
	Cu/Pb	70	17,25	0,0186	477	
	4,5	80	25,65	0,0192	527	
$Q = 2 \times 25$ $D_{is} = 72,8$ $D'_i = 18,7$	Cu/Cu 20,0	2×110	22,68	0,0184	587	575
	Cu/Pb	120	27,43	0,0189	582	
	20,0	140	37,52	0,0199	555	
$Q = 3 \times 35$ $D_{is} = 38,8$ $D'_i = 20,1$	Cu/Cu	3×100	7,03	0,0174	450	440
	9,6	130	11,8	0,0181	430	
	Cu/Pb	160	18,2	0,0189	418	
	5,8	180	26,5	0,0197	463	
$Q = 3 \times 50$ $D_{is} = 53,9$ $D'_i = 23,85$	Cu/Cu	3×140	15,25	0,0182	547	539
	10,8	160	19,2	0,0187	514	
	Cu/Pb	180	27,1	0,0193	553	
	10,8	200	34,1	0,0201	544	
$Q = 3 \times 95$ $D_{is} = 53,2$ $D'_i = 28,8$	Cu/Cu	3×200	11,5	0,0180	516	530
	8,2	220	17,6	0,0183	646	
	Cu/Pb	250	15,94	0,0186	444	
	8,2	280	24,2	0,0194	514	

Les valeurs moyennes concordent bien entre elles sauf celle relative au câble de 3×35 millimètres. Ce câble était établi, au point de vue de l'isolement, autrement que les autres. La valeur moyenne pour les autres câbles est 549, ou, en chiffres ronds 550 pour $\sigma_{k\tau}$.

En résumé, on voit que les valeurs pour la résistance calorifique spécifique de l'isolant sont les suivantes :

(1) Voir *Éclairage Électrique*, tome XLVIII, 28 juillet 1906, p. 153.

(2) *Éclairage Électrique*, tome XLIII, 15 avril 1905, p. 60.

Câbles à un conducteur (basse tension) 650.
Câbles torsadés — 600.
— (haute tension) 550.
Revêtement. . . . . 600.

Comme extrêmes, un câble a présenté le chiffre 893 comme valeur de $\sigma_{k\tau}$, et un câble à plusieurs conducteurs a présenté le chiffre 440 comme valeur de $\sigma_{k\tau}$.

Détermination de $\sigma_{n\tau}$.

Étude des matériaux en tubes. — Pour déterminer la constante relative au sol, les auteurs ont employé la disposition suivante :

Un tube horizontal en fer de 384 centimètres de longueur avec un diamètre intérieur de 20 centimètres était fermé à ses deux extrémités par des plaques en bois : un tube de laiton de $5^{cm},2$ de diamètre extérieur et 1 millimètre d'épaisseur était placé suivant son axe ; les extrémités du tube de laiton étaient raccordées, au moyen de fortes connexions, aux conducteurs d'amenée du courant. En des points aa', bb', cc' distants de 200 centimètres, 335 centimètres et 404 centimètres, on avait soudé sur le tube de laiton des fils fins aboutissant à un pont double par l'intermédiaire d'un commutateur double à trois directions. Ces trois paires de fils pilotes étaient employées pour vérifier si la distance des plaques de bois exerçait une influence ; les points cc' situés à 404 centimètres l'un de l'autre étaient placés en dehors de ces plaques.

L'espace existant entre le tube en laiton et le tube en fer était rempli par les matériaux à étudier. Dans les premières expériences, la température du tube de fer était mesurée au moyen d'un thermomètre plongé dans un godet métallique soudé rempli de mercure. Ce mode de mesure de la température pouvant conduire à quelque inexactitude, on établit, dans la suite, un dispositif dans lequel un tube placé au-dessus du tube de fer et muni d'un grand nombre de petits trous arrosait le tube de fer sur toute sa longueur ; l'eau coulait de là dans une gouttière inférieure et l'on pouvait mesurer la température de l'eau au-dessus et au-dessous du tube ; les deux températures étaient d'ailleurs presque rigoureusement égales. L'arrosage du tube commençait quelque temps avant le passage du courant, afin que la température fût bien la même que celle de l'eau. La température du tube de laiton était déterminée d'après la résistance électrique, le coefficient de température du laiton ayant été précédemment déterminé et trouvé égal à 0,0019. Le tableau IX résume les résultats d'expériences.

TABLEAU IX

J en Amp.	TEMPÉRATURE du tube de laiton.	du tube de fer.	FILS EMPLOYÉS	τ	DURÉE DE L'ESSAI minutes.	ÉTAT STATIONNAIRE au bout de minutes.	$\sigma_{n\tau}$	MOYENNE $\sigma_{n\tau}$
Sable à 0,4 °/o d'humidité, sans arrosage.								
150	28,2	22,1	$\overline{cc'}$	6,1	1 080	900	314	322
300	56,1	29,9	$\overline{cc'}$	26,2	1 055	950	321	
200	36,45	25,1	$\overline{bb'}$	11,35	1 410	900	324	
Le même, avec arrosage.								
200	20,35	10,0	$\overline{bb'}$	10,35	517	400	305	
300	36,0	9,0	$\overline{bb'}$	27,0	460	370	344	
Sable à 4,4 °/o d'humidité, avec arrosage.								
240	13,55	9,8	$\overline{aa'}$	3,75	237	150	78	81
»	13,54	9,8	$\overline{bb'}$	»	»	»	»	
»	14,86	9,8	$\overline{cc'}$	»	»	»	»	
500	28,4	10,1	$\overline{aa'}$	18,3	256	170	85	
»	28,0	10,1	$\overline{bb'}$	»	»	»	»	
»	30,0	10,1	$\overline{cc'}$	»	»	»	»	
Sable à 9,9 °/o d'humidité, avec arrosage.								
320	15,8	9,9	$\overline{aa'}$	5,9	317	160	69	62
400	19,2	9,6	$\overline{aa'}$	9,6	176	160	55	
Terre normale à 12 °/o d'humidité.								
300	19,17	9,97	$\overline{aa'}$	9,2	390	210	126	117
450	28,8	10,1	$\overline{aa'}$	18,7	190	—	109	

Pour obtenir des résultats indépendants du mode d'expérience, on étudia en couches minces la terre normale dont la constante figure en dernier sur le tableau IX. Dans ce but, on employa un tube de laiton de 5 centimètres de diamètre intérieur, à l'intérieur duquel était placé un fil de cuivre de 8 millimètres de diamètre maintenu exactement suivant l'axe au moyen de deux rondelles en bois. Les résultats sont indiqués par le tableau X : malheureusement on était obligé de retirer de la terre tous les cailloux trop gros.

Les valeurs trouvées sont un peu plus faibles que celles du tableau IX, mais la diminution peut très bien être attribuée à l'enlèvement des pierres et cailloux.

Dans le premier dispositif expérimental avec tube horizontal, on pouvait supposer qu'une

couche d'air s'était formée à la partie supérieure entre la terre et le tube de fer. On plaça alors le tube verticalement et on disposa le système d'arrosage de façon à faire couler l'eau tout le

TABLEAU X

J en Amp.	TEMPÉRATURE du fil de cuivre	TEMPÉRATURE du tube de laiton	τ	DURÉE DE L'ESSAI en minutes	ÉTAT STATIONNAIRE au bout de minutes	$\sigma_{n\tau}$	MOYENNE $\sigma_{n\tau}$
200	15,44	12,25	3,19	30	5	88	
300	20,63	12,9	7,73	20	10	90	90
400	27,17	12,7	14,47	20	10	92	

long du tube. Le conducteur intérieur de courant était un fil de cuivre de 6 millimètres de diamètre. Les fils pilotes allant au pont double embrassaient 1 mètre du conducteur de courant au milieu du tube. Pour une terre à 11 °/₀ d'humidité, les résultats ont été les suivants (tableau XI).

TABLEAU XI

J en Amp.	TEMPÉRATURE du conducteur	TEMPÉRATURE du tube	$\rho\tau$	τ	DURÉE D'OBSERVATION en minutes	ÉTAT STATIONNAIRE au bout de minutes	$\sigma_{n\tau}$	MOYENNE $\sigma_{n\tau}$
222	23,54	8,5	0,0177	15,04	555	150	88	
300	44,6	8,5	0,0191	36,1	360	240	106	102
300	47,9	8,75	0,0194	39,15	450	250	113	

D'après les expériences, la valeur de $\sigma_{n\tau}$ ne dépend pas de la température. Les chiffres contenus dans le tableau montrent qu'il existe une différence importante entre le sable très sec (artificiellement séché) et le sable ou la terre humide. Ce fait montre à nouveau que le degré d'humidité du sol dans lequel est placé le câble influe beaucoup sur l'échauffement de celui-ci. L'humidité moyenne pratique du sable est comprise entre celle des deux échantillons essayés humides ; on peut donc prendre en moyenne, pour le sable pur, la valeur 70 comme résistance calorifique spécifique. Pour la terre normale, la valeur moyenne est 100 ou 110. Ces valeurs sont toutes sensiblement plus élevées qu'on ne l'avait supposé jusqu'ici.

Étude du sol naturel. — On pouvait admettre que la terre essayée ne répondait pas exactement aux mêmes conditions que la terre dans laquelle est enfoui un câble. On fit alors l'expérience suivante :

Une spirale de chauffage formée d'un fil de constantan de 10 mètres de longueur enroulé sur une baguette en bois fut enterrée à 70 centimètres de profondeur comme un câble. Au milieu de la baguette était placée l'extrémité d'un thermomètre. D'autres thermomètres semblables étaient placés à 50 et 30 centimètres de profondeur au-dessus de la spirale. Un thermomètre ordinaire indiquait la température à 5 centimètres de profondeur. La constante $\sigma_{n\tau}$ fut calculée au moyen de la formule connue pour la résistance dans la terre. Les résultats d'expérience, représentés par des courbes, montrent que, même ou bout de 60 heures environ, une température constante n'était encore atteinte ni à la résistance de chauffage, ni dans le sol à 50 et 30 centimètres de profondeur. L'état stationnaire fut atteint au bout de 260 heures : cela tient à la grande capacité calorifique du sol. La valeur absolue de $\sigma_{n\tau}$ n'a pas été déterminée.

Au point de vue pratique du problème de l'échauffement des câbles, on peut prendre, d'après ce qui précède, comme valeur moyenne de la résistance calorifique (apparente) spécifique du sol mou un chiffre compris entre 40 et 60 : ce chiffre se rapproche beaucoup de celui admis par Forchheimer pour les conducteurs sous-marins ; il concorde bien avec les résultats expérimentaux et les déductions qu'on en peut tirer.

B. L.

Sur les câbles isolés au caoutchouc. — **Langan.** — *Proceedings of American Institute.*

L'auteur donne le résultat d'un certain nombre d'expériences exécutées sur les câbles au caoutchouc et sur le caoutchouc lui-même. Il indique que, parmi tous les isolants, le caoutchouc vulcanisé est le meilleur pour la fabrication des câbles électriques. La durée de ce corps est inversement proportionnelle à sa teneur en résines : cette teneur doit être inférieure à 5 °/₀. L'isolant employé doit contenir 30 à 32 °/₀ de para pur. Les expériences ont montré que les câbles doivent être isolés sans revêtement et sans enveloppe, après un séjour de 48 heures à 38° dans de l'eau. D'après l'auteur, les conditions d'essai doivent être les suivantes :

Tension d'utilisation.	volts	600	3 500	5 000	11 000
Tension d'essai. . .	volts	1 000	5 000	10 000	15 000
Durée d'électrisation.	secondes	60	60	60	60

Les épreuves à faire subir au caoutchouc pour vérifier ses qualités mécaniques sont les suivantes : un morceau de 5 centimètres de longueur doit pouvoir être étendu jusqu'à 15 centimètres sans présenter un allongement supérieur à 20 °/₀. Après cette extension, on doit répéter quatre fois l'expérience et l'allongement permanent ne doit pas dépasser 25 °/₀. Un morceau de caoutchouc découpé dans un câble fabriqué, et ayant 1^{mm},5 d'épaisseur et 15 millimètres de largeur, doit présenter une résistance à la traction de 50 à 60 kilogrammes par centimètre carré et s'allonger, sans rupture, à 3,5 fois sa longueur.

R. R.

TRACTION

Développement des installations de traction par courant continu à haute tension en Europe.

Outre la ligne de Bonn à Cologne dernièrement décrite [1] et exploitée sous 1 000 volts, on établit à Cologne des lignes suburbaines à 700 ou 800 volts [2]. De Castellamare à Sorrento (Italie), on a établi une ligne à 825 volts : la voie a 20 kilomètres de longueur et un écartement de 950 millimètres avec une rampe maxima de 6,2 °/₀ et une courbe de rayon minimum de 15 mètres ; la vitesse maxima est de 30 kilo mètres à l'heure : douze automotrices font le service avec des moteurs de 50 chevaux. Entre Bellinzona et Mezocco, on établit une ligne avec voies de 1 mètre d'écartement, qui sera alimentée sous 1 500 volts continus. Cette ligne sera ouverte à l'exploitation dans le courant de l'automne 1906. Chaque automotrice sera munie de quatre moteurs de 75 chevaux capables de remorquer 60 tonnes sur une rampe de 6 °/₀ à la vitesse de 20 kilomètres à l'heure. Entre Maizières et Sainte-Marie (mines de la Moselle), une voie de 14^{km},5 de longueur sera exploitée au moyen de courant continu à 2 000 volts.

Ces différentes installations montrent la tendance marquée existant actuellement pour l'élévation de la tension employée dans les installations de traction par courant continu, élévation dont l'effet est de permettre la suppression ou l'espacement plus grand des points d'alimentation intermédiaires et la diminution de l'intensité de courant recueillie par les automotrices.

O. A.

(1) Voir *Éclairage Électrique*, tome XLVII, 5 mai 1906, p. 174.

(2) On sait, en outre, que le chemin de fer métropolitain de Berlin fonctionne avec du courant continu à 800 volts.

Système de commande des trains à unités multiples. — **Harding et Clark.** — *Electrical Review*, New-York, 27 juin 1906.

Le nouveau système de commande de trains à unités multiples présente l'avantage d'exiger un seul fil pilote parcourant tout le train. Ce fil unique permet au mécanicien de tête de produire, sur toutes les automotrices, le démarrage, l'arrêt, l'inversion du sens de marche, et la marche à toutes les vitesses. Chaque automotrice est munie d'un appareil électromagnétique commandant le controller de réglage. Cet appareil électromagnétique est muni d'un double enroulement dont les extrémités sont reliées l'une à la ligne du train, et l'autre à la masse métallique de la voiture. Le point milieu de l'enroulement est connecté au fil pilote. L'enroulement de l'appareil électromagnétique est disposé de façon que le courant passe en sens inverse dans les deux moitiés, l'effet magnétisant de chaque moteur neutralisant celui de l'autre moitié. Le maître-controller ou manipulateur est constitué par un rhéostat divisé en deux parties dont l'une est reliée à la ligne du train et l'autre à la terre. Une manette permet de mettre le fil pilote en contact avec l'une ou l'autre des séries de plots du rhéostat et de shunter ainsi plus ou moins fortement l'un ou l'autre des enroulements des appareils électromagnétiques : quand la manette est au zéro, ceux-ci reviennent au point neutre. Quand la manette est sur une touche quelconque, le courant passant dans l'un des enroulements est supérieur à celui qui passe dans l'autre enroulement ; le noyau de l'appareil électromagnétique se déplace et entraîne avec lui le controller de réglage de l'automotrice. Plus la différence entre les courants est grande et plus est prépondérante l'action d'un des deux enroulements. On peut ainsi donner aux controllers des différentes automotrices toutes les positions correspondant aux différentes vitesses et aux différents sens de marche.

R. R.

***Méthode pour surveiller d'une façon permanente les courants vagabonds.* — W. Kohlrausch.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 21 juin 1906.

L'auteur indique la méthode suivante, simple et peu coûteuse. Le feeder d'alimentation et le câble de retour de chaque zone d'alimentation sont branchés, à l'usine génératrice, sur un compteur différentiel, et les résistances en série sur les câbles de retour sont réglées de telle façon que tous les compteurs soient au zéro. Si un compteur marque à un moment un courant de retour supérieur au courant d'alimentation, on augmente la résistance en série du câble de retour et inversement. Une vérification hebdomadaire des compteurs avec réglage des résistances en série doit suffire amplement. Ces résistances peuvent être construites très simplement et être formées, par exemple, par des bandes de manganin ou d'autre métal résistant, avec un contact mobile. Par suite des fortes variations de courant, les anciens watts-heure-mètre à pendule doivent donner les meilleurs résultats comme compteurs. Ces compteurs n'ont d'ailleurs pas besoin d'être très sensibles : il faut seulement que les deux paires de bobines du courant d'alimentation et du courant de retour aient bien une action différentielle, et il faut veiller à ce que les flux des compteurs agissant différentiellement ne soient pas inégalement influencés par des champs magnétiques extérieurs.

O. A.

MESURES

***Appareil enregistrant la vitesse de rotation et le degré d'uniformité des machines.* — F. Lux.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1er juin 1906.

L'indicateur de fréquence et de vitesse de Frahm (1) a reçu, dans les deux dernières années, un grand nombre d'applications. Mais, jusqu'à présent, on n'était pas parvenu à rendre cet appareil enregistreur en essayant de faire tracer aux lames vibrantes elles-mêmes des points sur une bande de papier. Une solution simple consiste dans l'emploi d'une méthode photographique, chaque languette vibrante interceptant un rayon lumineux quand elle est immobile et le laissant passer quand elle oscille.

(1) Voir *Éclairage Électrique*, tome XLIII, 27 mai 1905, page 317.

L'appareil basé sur ce principe comprend une enveloppe métallique cylindrique fermée tournant sous l'effet d'un mouvement d'horlogerie, un tambour recouvert d'une feuille de papier photographique, un peigne à languettes vibrantes parallèle à l'axe longitudinal du cylindre et une source lumineuse (bec Auer ou lampe à incandescence), placée du côté opposé au peigne. L'extrémité repliée de chaque languette vibrante est placée, avec un jeu d'une fraction de millimètre, devant l'embouchure d'un petit tube ayant environ 20 millimètres de longueur et $0^{mm},2$ de diamètre intérieur. Normalement, le trajet des rayons lumineux émanant du bec Auer ou de la lampe à incandescence est intercepté par la tête de la languette immobile et ne peut pénétrer dans l'enveloppe. Quand une ou plusieurs languettes du peigne vibrent sous l'effet d'une excitation électrique ou mécanique, ces languettes laissent passer le rayon lumineux des petits tubes correspondants et chaque languette saillante est marquée par une bande noire sur le papier sensible. Suivant l'écart des fréquences d'oscillations de différentes languettes ou d'après la longueur des petits tubes, on fait en sorte qu'une seule languette, ou deux au plus, laissent passer simultanément les rayons lumineux.

Si la vitesse du papier est faible, tous les points lumineux qui impressionnent le papier se recouvrent partiellement et forment une bande continue. Si la vitesse de déplacement du papier est élevée, on obtient une succession de points formant une ligne pointillée. En disposant sur l'appareil un petit tube qu'ouvre et que ferme le mouvement d'un pendule, on peut obtenir sur le papier photographique des points de repère indiquant le temps.

Cette méthode simple offre l'avantage de laisser aux languettes vibrantes toute leur liberté d'oscillation ; l'inconvénient est que l'on ne peut pas suivre au fur et à mesure les variations de vitesse ou de fréquence, mais qu'on est obligé de retirer d'abord la bande de papier photographique et de la développer.

E. B.

***Nouvel appareil de mesure pour les courants alternatifs de faible intensité.* — W. Vœge.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 17 mai 1906.

Les seuls appareils ne présentant ni self-induction, ni capacité et indépendants de la fré-

quence et de la forme des courants alternatifs à mesurer sont les appareils thermiques, ou appareils reposant sur l'action calorifique du courant. Mais tous les appareils thermiques couramment employés présentent une consommation propre élevée qui, troublant toutes les mesures, rend presque impossibles les mesures des courants de très faible intensité. Par exemple, un ampèremètre thermique Hartmann et Braun consomme 0,68 watt pour sa déviation maxima. Le Pr Feussner a proposé de déterminer thermo-électriquement la chaleur développée par le passage du courant à mesurer : il fait passer ce courant dans une bobine de fil entourant la soudure du thermo-élément. Ce n'est qu'au bout d'une minute environ que l'aiguille atteint sa position de repos.

L'auteur, partant d'un type d'appareil fréquemment employé comme détecteur d'ondes électriques et constitué par deux fils placés en croix, l'un en constantan et l'autre en fer[1], a pu établir un appareil thermique susceptible d'être employé dans les laboratoires et d'être étalonné au moyen de courant continu. Dans l'appareil précédent, où le courant à mesurer traverse d'abord le fil de constantan et ensuite le fil de fer, ou inversement, on obtient, par suite de l'effet Peltier, des indications différentes suivant la direction du courant. Pour éviter cet inconvénient, l'auteur fait passer le courant à mesurer dans un fil de platine et fixe, en un point de ce fil chaud, un fil de fer et un fil de constantan placés en croix avec le fil de platine et formant chacun une branche de la croix. La chaleur développée dans le fil de platine agit alors par conduction sur l'élément thermo-électrique : les deux fils actifs sont aussi fins que possible pour présenter une faible masse à échauffer : l'aiguille prend alors presque instantanément sa position.

Dans ces conditions, le sens du courant n'influe pas sur les indications de l'appareil, ou tout au moins influe extrêmement peu. La faible influence que l'on constate est due à ce que le point de jonction n'est pas un point mathématique, mais présente des dimensions déterminées, pour lesquelles il se produit, sur le fil chaud, une chute de tension qui s'ajoute aux indications pour un sens du courant et s'en retranche pour l'autre sens. Les écarts étant égaux, il suffit, pour étalonner l'appareil sur courant continu, de renverser le sens de ce courant et de prendre la moyenne des lectures. Le tout est placé dans une ampoule en verre, que l'on plonge dans un bain de pétrole pour maintenir à une température constante les soudures. Ainsi construit, cet appareil est insensible aux courants d'air. Pour empêcher qu'un courant exagéré ne brûle le fil de platine, il est bon de placer en série avec lui, à l'extérieur de l'appareil, un fil de fer de 2 millimètres de diamètre et de 2 millimètres de longueur.

Avec l'appareil établi par l'auteur, on peut obtenir une différence de potentiel atteignant 10 millivolts aux bornes du thermo-élément sans que la soudure soit endommagée par un trop fort échauffement. On peut employer n'importe quel voltmètre sensible et précis pour mesurer cette différence de potentiel. La résistance propre du fil chaud est de 4 ohms environ, y compris celle du fil fusible en fer intercalé en série par mesure de sécurité. On peut atteindre une grande sensibilité en employant un millivoltmètre spécial de très faible résistance : on peut obtenir d'ailleurs une graduation à divisions à peu près égales en employant un entrefer dissymétrique de façon qu'il corresponde de fortes déviations aux faibles courants et de faibles déviations aux courants intenses, pour corriger l'inconvénient que les indications du thermo-élément sont proportionnelles au carré de l'intensité du courant. On peut augmenter encore beaucoup la sensibilité en vidant l'ampoule de verre dans laquelle sont placés les fils, car la conductibilité calorifique des gaz diminue beaucoup avec leur pression : on peut décupler ainsi la valeur des déviations ; malheureusement, le vide ne se maintient pas complètement, car il est impossible de chauffer suffisamment l'ampoule pendant le vidage sans risquer de détériorer la soudure, et, dans ces conditions, les parois de verre laissent dégager peu à peu de l'hydrogène. Malgré tout, le vide qui subsiste permet d'obtenir une sensibilité 5 fois plus grande que quand l'ampoule est remplie d'air.

La consommation propre d'un tel appareil est très faible : alors qu'un thermique de Hartmann et Braun consomme environ 0,68 watt pour 0,3 ampère, le nouvel ampèremètre thermique consomme environ huit fois moins, comme le montre le tableau I.

---

[1] Voir Drude. *L'Éclairage Électrique*. tome XLIII, 27 mai 1905, p. 285, fig. 2.

TABLEAU I

COURANT DANS LE FIL CHAUD en ampères.	DÉVIATION EN MILLIMÈTRES	
	AIR A LA PRESSION atmosphérique.	APRÈS VIDAGE
0,002	»	6,0
0,005	»	37,8
0,010	29,7	157
0,015	»	357
0,020	121	643
0,030	275	»
0,035	374	»

Dans ces expériences, le voltmètre était un appareil à miroir de Siemens et Halske de 30 ohms de résistance avec sensibilité de 1 division pour 10^{-8} ampère, pour une distance de l'échelle de 2^m,50. On obtient une plus grande sensibilité avec un galvanomètre de 10 ohms : dans ce cas, on a une déviation de 24 divisions pour un courant de 1 milliampère. Si l'on pouvait employer une autre soudure que la soudure ordinaire, on augmenterait encore la sensibilité.

B. L.

Emploi, dans différentes méthodes de mesure, de l'interrupteur à jet de mercure comme commutateur. — **Zenneck.** — *Drudes Annalen*, juillet 1906.

Comme l'on sait, l'interrupteur à jet de mercure consiste en un tube vertical muni à sa partie inférieure d'une sorte de pas de vis hélicoïdal plongeant dans le mercure et à sa partie supérieure d'une tubulure perpendiculaire. Ce tube est mis en mouvement par un petit moteur électrique et tourne autour de son axe. Le mercure s'élève et jaillit, en un jet fin, par la tubulure latérale. Ce jet établit, avec un segment métallique concentrique au tube, un contact périodique qui ferme et ouvre alternativement un circuit électrique

Cet appareil peut être modifié facilement pour servir de commutateur dans un certain nombre de méthodes de mesure. Pour cela, il suffit de placer un second segment métallique contre lequel vient frapper le jet liquide métallique : ce segment est relié à une troisième borne.

Avec l'appareil ainsi modifié, on peut, par exemple, mesurer la capacité d'un condensateur en reliant l'une des armatures de celui-ci au mercure dans lequel plonge le tube, l'un des segments au pôle d'une pile et l'autre à la borne du galvanomètre; l'autre borne du galvanomètre, celle de la pile et la seconde armature du condensateur sont reliées ensemble. On peut, de même, déterminer la polarisation de cuves électrolytiques.

Si l'on remplace le galvanomètre par deux bobines entre lesquelles est placé un tube de Braun, il se produit, lors de la décharge du condensateur, des oscillations propres dans le circuit formé par celui-ci et les deux bobines, si l'axe de l'interrupteur porte un petit miroir, la courbe d'oscillations apparaît fixe dans celui-ci, car les oscillations se produisent toujours pour une même position de miroir. La courbe peut donc être facilement montrée ou photographiée. De même, on peut montrer l'élévation de courant au moment de la fermeture d'un circuit contenant de la self-induction, les phénomènes primaires et secondaires en jeu dans une bobine d'induction, etc.

E. B.

CHARTRES. — IMPRIMERIE DURAND, RUE FULBERT. *Le Gérant :* J.-B. NOUET.

Tome XLVIII. Samedi 11 Août 1906. 13e Année. — N° 32.

L'Éclairage Électrique

REVUE HEBDOMADAIRE DES TRANSFORMATIONS

Electriques — Mécaniques — Thermiques

DE

L'ÉNERGIE

EXPRESSION DE LA PÉRIODE DE VIBRATION IONIQUE ET ÉLECTRONIQUE ET SES CONSÉQUENCES *(fin)*(¹)

La nature du diélectrique est-elle modifiée par la présence d'un sel dissous ?

Ayons recours à l'expérience pour trancher la question. S'il en était ainsi, la charge d'un ion, qui est inversement proportionnelle à la constante k^2 de la loi de Coulomb pour le diélectrique considéré, serait alors directement proportionnelle à l'indice de réfraction non de l'eau-diélectrique seulement, mais de la solution elle-même, et en remplaçant l'indice de réfraction par sa relation avec le poids spécifique, on aurait :

$$q = \frac{\alpha \times S}{4\pi \times k^2} = \beta \times n^2 = \beta \times (1 + 0{,}33 \times \pi)^2.$$

En conséquence l'équivalent électrochimique varierait avec la concentration dans les proportions suivantes :

$$SO^4Cu \text{ à } \left\{ \begin{matrix} \pi = 1{,}07 & n = 1{,}35 & n^2 = 1{,}82 \\ \pi = 1{,}20 & n = 1{,}40 & n^2 = 1{,}96 \end{matrix} \right\} \frac{1{,}82}{1{,}96} = 0{,}93,$$

c'est-à-dire d'environ 7 °/₀ pour cet écart de concentration.

Or l'expérience montre qu'il n'en est rien, et confirme l'exactitude rigoureuse de la loi électrochimique de Faraday. On trouve, par exemple, un même courant ayant traversé pendant un même temps deux voltamètres à sulfate de cuivre en série, l'un à $\pi = 1{,}07$; l'autre à $\pi = 1{,}20$:

(¹) Voir l' *Eclairage Electrique*, t. XLVIII, 4 août 1906, p. 167.

	Solution diluée. $\pi = 1,07$	Solution concentrée. $\pi = 1,20$
Perte de poids des anodes	0,1561	0,1560
Augmentation de poids des cathodes	0,1557	0,1527

On remarquera, en passant, que la mesure par perte de poids des anodes est toujours plus certaine, une partie du cuivre déposé par la cathode pouvant tomber pour une raison quelconque, par manque d'adhérence, par exemple.

Ainsi la loi de Faraday est rigoureusement exacte, et la constante k^2 ne varie pas avec la concentration. Et en effet, la constante k^2 se rapporte exclusivement au diélectrique qui se trouve entre les ions, et non à la solution elle-même. Or, entre les ions, le diélectrique n'a pas varié avec la concentration, et il est resté constitué par de l'eau pure pour laquelle le pouvoir inducteur spécifique est $K = \frac{1}{k^2} = 80$ environ.

Mais on voit par là même que, dans un milieu ionisant autre que l'eau, la charge des ions serait également constante, mais elle aurait pris une autre valeur, inversement proportionnelle à k^2 et par suite directement proportionnelle au pouvoir inducteur spécifique K. D'où il résulte que c'est dans l'eau diélectrique que les ions portent leur plus grande charge électrique, environ 80 fois plus considérable que dans un gaz sec ionisé par un mode opératoire quelconque, par les rayons X par exemple.

Ainsi la conductibilité électrique par les gaz ionisés vient se rattacher et s'identifier avec le phénomène de l'électrolyse : on y retrouve d'ailleurs la pseudo-mobilité différente des ions + et —, c'est-à-dire le phénomène du déplacement des ions têtes de files, et la polarisation des électrodes lorsque toutes les files d'ions sont en état de vibration électrolytique : après avoir suivi la loi d'Ohm lorsque la tension croissait, le courant prend une valeur maxima, le *courant de saturation*, quelque grande que devienne la tension appliquée.

Résistivité d'un gaz ionisé. — On a trouvé précédemment :

$$\rho = k^2 \times T = \beta \times \sqrt{M} \times \frac{k}{q} \times \varepsilon^{\frac{3}{2}},$$

et :

$$q = \frac{\alpha \times S}{4\pi \times k^2},$$

d'où l'on déduit :

$$\rho = \frac{\beta}{\alpha} \times 4\pi \times \frac{\sqrt{M}}{S} \times k^3 \times \varepsilon^{\frac{3}{2}} = \frac{\beta}{\alpha} \times 4\pi \times \frac{\sqrt{M}}{S} \times k^3 \times \frac{1}{\left(\frac{m}{V}\right)^{\frac{1}{2}}},$$

$\left(\frac{m}{V}\right)$ étant la concentration ionique.

En considérant le même corps, HCl par exemple, en solution aqueuse ou en gaz sec ionisé, on a par suite, comme rapport des résistivités :

$$\frac{\rho\,(\text{gaz sec ionisé})}{\rho'\,(\text{solution aqueuse})} = \frac{k^3}{k'^3} \times \frac{\left(\frac{m}{V}\right)'^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{m}{V}\right)^{\frac{1}{2}}} = \left(\frac{80}{1}\right)^{\frac{3}{2}} \times \frac{\left(\frac{m}{V}\right)'^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{m}{V}\right)^{\frac{1}{2}}} = 729 \times \frac{\left(\frac{m}{V}\right)'^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{m}{V}\right)^{\frac{1}{2}}}.$$

On voit par là combien est grande la résistivité des gaz ionisés, d'autant plus que la concentration $\left(\frac{m}{V}\right)$ est très faible devant la concentration $\left(\frac{m}{V}\right)'$ d'une solution aqueuse, dont

la pression osmotique pour 1 molécule-gramme seulement par litre est déjà de 22 atmosphères environ, et l'ionisation par dissolution étant considérable par suite du pouvoir diélectrique très élevé de l'eau.

Avec les gaz ionisés, il est donc nécessaire d'appliquer par les électrodes une forte tension pour constater quelque chose, et le courant ne peut se mesurer qu'avec des électromètres. Mais on voit que la résistivité diminue lorsque la concentration en ions $\left(\frac{m}{V}\right)$ augmente : c'est ce que l'on constate lorsqu'on fait tomber sur le gaz ionisé un plus large faisceau de rayons X.

Phénomènes de luminescence produits par la décharge dans les gaz raréfiés. — On a trouvé pour la période de vibration électrolytique l'expression :

$$T = \beta \times \frac{\sqrt{M}}{k \times q} \times \varepsilon^{\frac{3}{2}} = \frac{\beta}{\alpha} \times 4\pi \times k \times \frac{\sqrt{M}}{S} \times \varepsilon^{\frac{3}{2}}.$$

Appliquons cette expression à un gaz ionisé renfermé dans une ampoule et soumis à une tension électrique entre électrodes. Faisons le vide dans l'ampoule. A partir d'une dilution suffisante, l'ionisation étant devenue presque totale, la distance ε entre les ions augmente avec la perfection du vide ; par suite, la période de vibration, d'abord extrêmement courte, croît en même temps que le vide augmente. Il arrive donc un moment où la période de vibration atteint, *en croissant,* une des limites où un mouvement vibratoire, transmis par les vibrations synchrones de l'éther, apparaît lumineux pour l'œil. Comme c'est par une augmentation de la période de vibration que le mouvement vibratoire devient visible, il en résulte que ce caractère de visibilité doit commencer du côté de l'ultra-violet dans le spectre, et non du côté de l'infra-rouge. On constate, en effet, l'impression des plaques photographiques, puis la région du spectre du côté du violet devient directement visible. On *voit* alors, dans le phénomène lumineux, les vibrations mêmes des ions en état de vibration électrolytique sous le passage du courant, et l'épanouissement des faisceaux de files d'ions : c'est l'illumination des tubes de Geissler et des ampoules de Crookes.

Il se produit ainsi le même phénomène qu'à l'autre bout de l'échelle dans la gamme des vibrations, lorsqu'un mouvement vibratoire très lent s'accélère suffisamment pour être perceptible à l'oreille et devenir sonore.

On voit, par ce qui précède, que la période de vibration ionique et électronique est encore plus courte que celle des radiations lumineuses. Mais chaque fois qu'on l'augmentera suffisamment par un mode d'action quelconque, la propagation du mouvement vibratoire électrique s'accompagnera alors de phénomènes lumineux, sensibles d'abord à la plaque photographique (ultra-violet) et ensuite à l'œil.

Ainsi un diélectrique quelconque, un gaz par exemple, par suite des vibrations perpétuelles des molécules, possède un très petit nombre d'ions en état d'équilibre chimique.

On peut augmenter cette ionisation en fournissant de l'énergie *positive* au système : l'équilibre se déplace alors, en effet, dans le sens endothermique, c'est-à-dire vers un état d'ionisation plus considérable.

On fournit de l'énergie positive au diélectrique en le soumettant à une cause d'ébranlement moléculaire, en le mettant en état de vibration énergique par des rayons X par exemple, ou par la présence de corps radioactifs : plus les chocs intérieurs seront nombreux, plus les ions seront eux-mêmes en quantité considérable, et plus la conductibilité électrolytique sera prononcée.

On comprend, d'autre part, l'action des aimants sur les phénomènes de luminescence :

elle se rattache à l'action des aimants sur les courants, le faisceau luminescent étant constitué par l'ensemble des files d'ions en état de vibration électrolytique, c'est-à-dire par des lignes de courant.

On s'explique enfin le phénomène de production du *brouillard,* condensation de la vapeur d'eau par les groupements d'ions. En effet, l'énergie d'un groupe d'ions a pour expression :

$$q \times v = \alpha \times \frac{S}{4\pi \times k^2} \times \alpha \times \varepsilon = \frac{\alpha^2}{4\pi} \times S \times \varepsilon \times K.$$

Pour une même valeur ε, de l'écartement des ions, l'énergie du groupe d'ions est proportionnelle au pouvoir inducteur spécifique K du diélectrique interposé. Donc, lorsque le pouvoir inducteur spécifique passe de 1 (gaz sec) à 80 (eau-diélectrique liquide), il y a une cause d'absorption de l'énergie mise en liberté par la condensation de la vapeur d'eau (chaleur latente du changement d'état), et cette condensation peut dès lors se produire, entraînant le système vers un état de minimum d'énergie potentielle. Les groupements d'ions constituent donc autant de noyaux de condensation de la vapeur d'eau dans le phénomène du brouillard.

Contraction et ionisation. — On a vu précédemment (1) qu'en solution diluée l'apparition ou la disparition de 1 ion-gramme par litre s'accompagnait d'une contraction ou d'une dilatation de 10 centimètres cubes en chiffres ronds.

Il ne faudrait cependant pas en conclure que le maximum d'ionisation corresponde au maximum de contraction, car il n'y a pas là une simple loi de proportionnalité, et d'autres facteurs interviennent dans le phénomène, la tension des ions notamment.

C'est ainsi que la relation :

$$\rho \times \left(\frac{m}{V}\right)^{\frac{1}{2}} \times \frac{1}{\sqrt{M}} = \text{constante},$$

ne se trouve pas forcément vérifiée pour des solutions équimoléculaires, mais bien pour des solutions isotoniques, pour lesquelles, l'ionisation étant la même, on aurait par suite :

$$\frac{\rho}{\sqrt{M}} = \frac{\rho'}{\sqrt{M'}}.$$

Introduction de la densité de courant, de la densité de quantité d'électricité. — Polarisation des électrodes. — L'analyse du phénomène de l'électrolyse nous a conduits précédemment à établir la relation (2) :

$$E = V + k^2 \times T \times l \times \frac{i}{\varepsilon^2},$$

pour toute file d'ions orientés en état de vibration électrolytique.

Comme on a :

$$q = i \times T,$$

q étant la charge d'un ion, cette relation peut s'écrire :

$$E = V + k^2 \times l \times \frac{q}{\varepsilon^2},$$

étant entendu que le passage de cette quantité d'électricité q *coulombs* a exigé un temps T, période de vibration de la file d'ions, dont nous avons établi précédemment la valeur :

$$T = \alpha \times \frac{\sqrt{M}}{k \times q} \times \varepsilon^{\frac{3}{2}}.$$

(1) *Éclairage Électrique,* 1905, tome XLII, n° 3, p. 85.
(2) *Éclairage Électrique,* 1905, t. XLII, n° 4, p. 134.

En mettant en évidence la densité de courant (δ_i), et la densité de quantité d'électricité (δ_q), ces deux relations peuvent s'écrire :

$$E = V + k^2 \times T \times l \times \delta_i,$$

et :

$$E = V + k^2 \times l \times \delta_q.$$

On remarquera que si une surface d'électrode S laisse passer un courant I, ou une quantité d'électricité Q pendant le temps T, $\frac{S}{I}$ et $\frac{Q}{S}$ sont respectivement la densité de courant et la densité de quantité d'électricité qui interviennent dans ces expressions.

Et l'on a :

$$\frac{I}{S} \leqslant \frac{i}{\varepsilon^2},$$

et :

$$\frac{Q}{S} \leqslant \frac{q}{\varepsilon^2},$$

Les seconds membres constituent, en effet, le maximum de densité de courant et de densité de quantité d'électricité que rien ne saurait faire dépasser. Ils correspondent à la file d'ions en plein travail de vibration.

Or les premiers membres atteignent ces valeurs maxima au moment où toutes les files d'ions aboutissant à la surface S sont en état de vibration, et par suite au moment où se produit le phénomène de la *polarisation de l'électrode.*

Comme on l'a vu précédemment [1], c'est la vitesse même de réaction à l'électrode qui se trouve atteinte à ce moment. La vitesse de réaction est donc intimement liée au phénomène de la polarisation des électrodes, c'est-à-dire à l'arrêt de la décharge à un régime déterminé d'un couple électrochimique, — on en voit par là l'importance pratique, — et l'étude que nous venons de faire de la vibration ionique nous permettra d'en rechercher les lois. Ce sera l'objet d'un prochain article. Qu'il nous suffise aujourd'hui d'en donner l'expression générale, à interpréter dans chaque cas particulier, et que l'expérience vérifie :

$$\frac{dn}{dt} = m \times I_{\text{Maximum}} = m \times \frac{S}{l} \times \frac{\varphi}{k^2 T = \rho = x \times \frac{k}{q} \times \sqrt{M \times \varepsilon^3}}.$$

Remarques générales sur la détermination de la résistivité électrolytique. — L'étude que nous venons de faire montre que pour toute file d'ions en état de vibration électrolytique, les ions têtes de files sont à des distances ε et ε' des électrodes telles que l'on ait :

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon'} = \sqrt[3]{\frac{M'}{M}}.$$

Si la densité de courant est très faible, la concentration aux électrodes ne varie guère, à cause des phénomènes de diffusion et du petit nombre d'ions têtes de files déplacés, mais elle varie nettement si on augmente progressivement la densité de courant, pour atteindre des valeurs limites bien déterminées au moment où toutes les files d'ions sont en état de vibration électrolytique, où tous les ions têtes de files sont par suite à leur écartement déterminé de l'électrode. Il suit de là que suivant la densité de courant pratiquée, il s'établit un certain régime dans l'électrolyte, et que la résistivité mesurée varie avec cette densité de courant.

(1) *Éclairage Électrique*, 1905, t. XLII, nº 4, p. 138.

Ceci explique les valeurs très diverses obtenues par différents expérimentateurs, principalement dans la détermination de la résistivité électrolytique des acides, à cause de la faible masse relative de l'ion hydrogène, et par suite du grand déplacement de cet ion tête de file.

Au contraire, les déterminations sont bien mieux concordantes pour les électrolytes dont les deux ions ont sensiblement la même masse, le chlorure de potassium, par exemple, les phénomènes de déplacement des ions têtes de files étant alors pratiquement peu importants.

Les chiffres suivants montrent en effet la diversité des déterminations expérimentales :

RÉSISTIVITÉ DE L'ACIDE SULFURIQUE

EXPÉRIMENTATEUR	TEMPÉRATURE EN DEGRÉS CENTIGRADES	POIDS SPÉCIFIQUE DE LA SOLUTION	RÉSISTIVITÉ EN OHMS PAR C/M³
Kohlrausch	18°	1,22	1,37
	18°	1,18	1,41
Eric Gérard	18°	1,21	0,83
Matthiessen	12°,3	1,215	0,83
	13°	1,19	0,87
Roux	17°	1,20	0,85
Fleming-Jenkin	18°	1,20	0,62

Kohlrausch a paru tourner la difficulté par un artifice ingénieux : il évite les phénomènes de tension à l'électrode en employant un courant alternatif et en remplaçant alors le galvanomètre du pont de Wheatstone par un récepteur téléphonique. Par le fait même du courant alternatif, il évite les phénomènes de déplacement des ions têtes de files.

Malheureusement ces mesures ne correspondent pas à la réalité : l'électrolyse véritable de l'électrolyte, par le passage d'un courant continu. On voit, en effet, par le tableau comparatif précédent, combien les nombres de Kohlrausch diffèrent de ceux des autres expérimentateurs, assez concordants au contraire. Les déterminations de Kohlrausch correspondent donc à une résistivité très spéciale, et non à ce qu'on peut proprement appeler la *résistivité électrolytique*.

Pour déterminer celle-ci et trouver une valeur toujours la même, il paraît nécessaire de considérer le moment où les concentrations aux électrodes ont pris leurs valeurs limites, où toutes les files d'ions sont en état de vibration électrolytique ; par conséquent au moment de la *polarisation simultanée* des deux électrodes. Celles-ci ne devraient donc pas avoir la même surface, mais des surfaces S et S' telles que l'on ait :

$$\frac{S}{S'} = \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon'^2},$$

ainsi qu'on l'a vu précédemment (¹), et par suite :

$$\frac{S}{S'} = \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon'^2} = \left(\frac{M'}{M}\right)^{\frac{2}{3}},$$

ainsi que l'a montré la présente étude.

Cela ne suffirait pas encore. Il faudrait aussi prendre garde à la tension appliquée pour

(¹) *Eclairage Electrique*, 1906, t. XLVI, n° 12, p. 449.

faire la mesure de manière à ne pas produire l'électrolyse d'un mélange. Nous verrons, en effet, dans une prochaine étude, celle de l'*électrolyse des mélanges,* qui constitue un cas très général (si l'on considère que l'eau elle-même est ionisée, et que la solution aqueuse d'un électrolyte constitue par suite toujours un mélange), que pour certaines tensions critiques et certaines densités correspondantes de courant, la résistance apparente de l'électrolyte varie brusquement, en même temps qu'apparaissent aux électrodes des substances nouvelles, dont les plus intéressantes évidemment sont constituées par des états allotropiques des différents métaux (cuivre, zinc, plomb, ...), et métalloïdes (oxygène, ozone, ... et, par réactions secondaires, eau oxygénée, acide persulfurique).

Rapport à donner aux surfaces actives des électrodes dans un couple électrochimique. — L'expérience a montré que, pour des surfaces actives sensiblement égales des deux électrodes, c'est toujours l'électrode positive, c'est-à-dire celle où se dégage l'hydrogène, qui se polarise la première.

On en voit ici la raison : les ions hydrogène ont une masse relativement très faible et leur écartement de l'électrode positive est par suite relativement très grand. Les files d'ions qui aboutissent à l'électrode positive sont donc notablement épanouies : il n'y a donc qu'un petit nombre de files d'ions aboutissant à l'électrode négative qui puissent aboutir à l'électrode positive. De là résulte ce fait de la polarisation de l'électrode positive avant celle de l'électrode négative, si ces deux électrodes ont des surfaces égales.

L'étude que nous venons de faire indique le rapport à donner aux surfaces S et S' des deux électrodes pour en obtenir le rendement le plus avantageux :

$$\frac{S}{S'} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon'}\right)^2 = \left(\frac{M'}{M}\right)^{\frac{2}{3}}.$$

Avec des surfaces d'électrodes dans ce rapport, toutes les files d'ions aboutissant à une électrode s'épanouiraient sur l'autre et pourraient se mettre en vibration électrolytique. Pour une densité de courant critique, la polarisation se produirait alors simultanément sur les deux électrodes : toute leur surface active serait donc utilisée.

Dans les couples électrochimiques, c'est toujours de l'hydrogène, de faible masse relative, qui se porte à l'électrode positive. Il faut donc toujours donner à l'électrode positive une surface active relativement plus grande que celle de l'électrode négative, et pour une surface proportionnée de l'électrode positive à l'électrode négative, l'emploi d'un dépolarisant deviendrait inutile.

On comprend en même temps pourquoi l'agitation ou la circulation rapide de l'électrolyte favorisent la dépolarisation de l'électrode : elles tendent à rétablir une concentration égale sur les deux électrodes, s'opposent par suite à l'épanouissement des files d'ions, et permettent ainsi à un plus grand nombre de files d'ions d'aboutir sur l'électrode en voie de polarisation, c'est-à-dire pour laquelle toutes les files d'ions qui y aboutissaient étaient déjà en état de vibration électrolytique.

Influence de la température sur la résistivité électrolytique. — On a :

$$\rho^2 \times \left(\frac{m}{V}\right) = \text{constante}.$$

En différentiant cette équation par rapport à la température, on obtient :

$$2 \times \left(\frac{m}{V}\right) \times \frac{d\rho}{dt} + \rho \times \frac{d\left(\frac{m}{V}\right)}{dt} = 0,$$

ou :

$$\frac{d\left(\frac{m}{V}\right)}{dt} = -\frac{2\left(\frac{m}{V}\right)}{\rho} \times \frac{d\rho}{dt}.$$

ρ et $\left(\frac{m}{V}\right)$ sont essentiellement positifs. Mais $\frac{d\rho}{dt}$ est négatif (fait d'expérience), car ρ décroît quand la température croît. Par suite $\frac{d\left(\frac{m}{V}\right)}{dt}$ est positif. Donc $\left(\frac{m}{V}\right)$ croît quand la température croît, et comme il y a dilatation, il suit de là que l'ionisation n'en est que plus prononcée.

Cette conclusion est conforme aux lois de l'équilibre chimique : l'élévation de température, énergie *positive* communiquée au système, le déplace dans le sens d'une absorption d'énergie, c'est-à-dire ici dans le fait d'une ionisation plus prononcée.

Comment varie la tension de décomposition de l'électrolyte avec l'élévation de température? — A priori, elle doit diminuer : les ions sont plus nombreux, partant plus rapprochés et séparés par une couche de diélectrique plus mince. La tension de décharge spontanée est donc plus faible. On le voit d'ailleurs manifestement sur la relation :

$$v = \frac{4\pi q k^2}{\times S} \times \varepsilon.$$

Or, on a, d'autre part :

$$\alpha q v = e - \nu e' - 2T \times \operatorname{Log} \frac{\left(\frac{km\nu}{V}\right)^{\nu}}{k\left(\frac{N-m}{V}\right)}.$$

On voit, en effet, que v diminue dans ces conditions, car le logarithme soustractif augmente, puisque le numérateur augmente et le dénominateur diminue quand $\left(\frac{m}{V}\right)$ croît, et que l'élévation de température fait croître $\left(\frac{m}{V}\right)$.

La différentiation de cette équation donnerait d'ailleurs l'expression de $\frac{dv}{dt}$.

Contentons-nous ici de la relation approchée, mais simple, et partant pratique :

$$\frac{dv}{dt} = \frac{2}{3} \times \gamma \times \frac{1}{\rho^{\frac{1}{3}}} \times \frac{d\rho}{dt},$$

tirée de la loi approchée: $v = \gamma \times \rho^{\frac{2}{3}}$.

Résistivité des conducteurs électriques, non électrolytiques : métaux, par exemple. — Influence de la température sur cette résistivité. — Tout ce qui a été dit des ions s'applique également aux électrons, c'est-à-dire que l'on a pour un métal, par exemple :

$$\rho \times \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{\frac{3}{2}} = \text{constante},$$

ε étant la distance des électrons, et $\frac{1}{\varepsilon^3}$ étant par suite la concentration $\frac{m}{V}$ du conducteur en électrons.

Si les électrons n'étaient pas distincts des molécules du métal, on pourrait poser, pratiquement :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \times (1 + \lambda t),$$

λ étant le coefficient de dilatation linéaire du métal et t la température.

On aurait par suite :

$$\rho^2 \times \frac{1}{\varepsilon_0^3 \times (1+\lambda t)^3} = \text{constante} = \beta^2,$$

c'est-à-dire :

$$\rho = \beta \times \varepsilon_0^{\frac{3}{2}} \times (1+\lambda t)^{\frac{3}{2}} = \rho_0 \times (1+\lambda t)^{\frac{3}{2}}.$$

Or, l'expérience ne vérifie pas cette relation. On en doit donc conclure que la conductibilité électrique d'un métal n'est pas due à ses molécules, mais à la présence d'*électrons* renfermés dans ce métal en plus ou moins grand nombre, et ayant une existence distincte de celle des molécules mêmes du métal.

L'inverse du carré de la résistivité donne une idée de la richesse en électrons des différents métaux, car l'on a :

$$\rho^2 \times \left(\frac{m}{V}\right) = \text{constante}.$$

En mettant en évidence l'indice de réfraction n du corps, ou par suite son poids spécifique π, par la constante k^2 de la loi de Coulomb, en même temps que la masse et la surface de l'électron, par la constance de la charge électrique, on a :

$$\rho = \frac{s}{\alpha} \times 4\pi \times \frac{\sqrt{M}}{S} \times k^3 \times \left(\frac{m}{V}\right)^{\frac{1}{2}} = \gamma \times \frac{\sqrt{M}}{S} \times \frac{1}{(1+0,33 \times \pi^3)} \times \left(\frac{m}{V}\right)^{\frac{1}{2}}.$$

On voit d'après ce qui précède qu'un *conducteur électrique*, un métal, par exemple, peut être considéré comme une *solution d'électrons,* de même qu'un *conducteur électrolytique* est manifestement une *solution d'ions.* La seule différence entre ces deux sortes de conducteurs est que les ions sont normalement électrisés et portent une charge de signe déterminé. Les électrons, au contraire, sont essentiellement neutres, et ne prennent une charge que par le passage du courant.

L'influence de la température mise en évidence par la différentiation de l'équation précédente, qui permet d'écrire :

$$\frac{d\left(\frac{m}{V}\right)}{dt} = -\frac{2\left(\frac{m}{V}\right)}{\rho} \times \frac{d\rho}{dt},$$

montre que la concentration en électrons est variable avec la température : elle décroît avec une élévation de température, car ρ et $\left(\frac{m}{V}\right)$ sont essentiellement positifs, et l'expérience montre que $\frac{d\rho}{dt}$ est positif pour les conducteurs électriques. Il n'y a pas, en effet, ici, comme pour les conducteurs électrolytiques, une augmentation de l'ionisation avec l'élévation de la température.

Comme on peut poser pratiquement, dans un faible intervalle de température, de 0 à 100° C. par exemple :

$$\rho = \rho_0 \times (1+\alpha t),$$

α étant un coefficient d'accroissement de résistivité par degré centigrade dont le tableau ci-joint donne la valeur, on en déduit :

$$\frac{d\rho}{dt} = \rho_0 \times \alpha,$$

NATURE DU MÉTAL ou COMPOSITION DE L'ALLIAGE	RÉSISTIVITÉ en microhms-c/m³, à 0°C. ρ	ACCROISSEMENT moyen de résistance par degré centigrade α	CONDUCTIBILITÉ relative %	QUANTITÉ proportionnelle au nombre d'électrons par unité de volume à 0°C. $\frac{1}{\rho^2}$
Argent	1,620	0,00385	100	0,38104
Cuivre pur étalon recuit	1,597	0,00390	100	0,3921
Or recuit	2,041	0,00365	79	0,2401
Or écroui	2,077	0,00365	78	0,2318
Aluminium recuit	2,777	0,00390	57,5	0,1297
Zinc comprimé	5,580	0,00365	28	0,03212
Platine recuit	8,981	0,00247	18	0,01240
Fer recuit	9,636	0,00500	16,86	0,01077
Acier doux	12,481	0,00434	12,8	0,00642
Nickel recuit	12,356	0,00500	13	0,00655
Ferro-nickel recuit	78,300	0,00093	2	0,0001631
Étain comprimé	13,103	0,00365	12	0,0058245
Plomb comprimé	19,465	0,00387	8,2	0,002639
Bismuth comprimé	130,100	0,00354	1,2	0,000059081
Mercure liquide	94,340	0,00072	1,7	0,0001124
Alliage 2Pt + 1Ag	24,187	0,00031	6,6	0,0017094
— 2Au + 1Ag	10,776	0,00065	14	0,008612
— 9Pt + 1Ir	21,633	0,00133	7,97	0,0021368
Maillechort	20,760	0,00044	7,77	0,0023203
Antimoine comprimé	35,210	0,00389	4,4	0,0008066

et par suite :

$$\frac{d\left(\frac{m}{V}\right)}{dt} = -\frac{2\alpha \times \rho_0 \times \left(\frac{m}{V}\right)}{\rho_0 \times (1+\alpha t)}.$$

Les variables se séparent :

$$\frac{d\left(\frac{m}{V}\right)}{\left(\frac{m}{V}\right)} = -2\alpha \times \frac{dt}{(1+\alpha t)}.$$

On obtient en intégrant :

$$\operatorname{Log}\left(\frac{m}{V}\right) = \operatorname{Log}\frac{\left(\frac{m}{V}\right)_0}{(1+\alpha t)^2}.$$

c'est-à-dire :

$$\left(\frac{m}{V}\right) = \frac{\left(\frac{m}{V}\right)_0}{(1+\alpha t)^2}.$$

Cette équation est la loi approchée de variation de la concentration en électrons d'un conducteur électrique en fonction de la température.

Georges Rosset.

MESURES FAITES SUR L'ARC AU MERCURE FONCTIONNANT AVEC UNE FORTE PRESSION DE VAPEUR(¹)

Nous avons fait un certain nombre de mesures photométriques et spectro-photométriques sur l'arc au mercure jaillissant dans les récipients en quartz. Les propriétés particulières de ce corps permettent de produire et d'étudier l'arc au mercure dans des conditions que l'on ne pouvait pas réaliser précédemment. Tandis que, par exemple, dans les lampes à mercure en verre ordinaire, on ne peut tolérer une chute de tension supérieure à 1 volt par centimètre de longueur d'arc, nous avons pu élever, dans les lampes en quartz, cette chute de tension à 30 volts et au delà. Par suite, les conditions de température et de pression diffèrent considérablement dans nos lampes de celles des expériences précédentes.

La lampe comprenait un tube prolongé par deux récipients contenant le mercure servant d'une part d'anode et d'autre part de cathode. L'amenée du courant était assurée par des tubulures inclinées: dans chacune de ces tubulures étaient disposés deux cônes en acier-nickel, l'un, à la partie inférieure, dirigé de l'intérieur vers l'extérieur, et l'autre, à la partie supérieure, dirigé de l'extérieur vers l'intérieur. Le cône supérieur était rendu étanche par un peu de mercure au-dessus duquel était coulé du mastic au chatterton. Du cône intérieur partait un fil de fer plongeant dans le mercure. Le cône supérieur servait à fermer la lampe et à maintenir le vide; le cône inférieur servait à maintenir la surpression existant à l'intérieur de la lampe lors des fortes charges.

Le récipient anodique et le récipient cathodique avaient une grandeur et une forme différentes. Le rapport de leurs dimensions correspondait à peu près au rapport de quantités de chaleur développées dans chacune d'eux. De cette façon, la vaporisation n'était pas beaucoup plus forte à l'anode qu'à la cathode. Cela est important pour un fonctionnement continu. Évidemment, le rapport exact des grandeurs nécessaires n'est jamais rigoureusement réalisé; c'est pourquoi l'on a eu recours à un dispositif assurant automatiquement l'égalité entre la chaleur développée et la chaleur radiée vers l'extérieur. Ce dispositif consiste en un étranglement du récipient cathodique avant sa jonction au tube lui-même: le mercure va jusqu'à cet étranglement. Si, pour une raison quelconque, la radiation de chaleur vers l'extérieur est trop grande, le niveau du mercure s'élève et la surface de mercure diminue. Or, la chaleur développée à cette surface est d'autant moins rapidement et moins complètement dissipée que cette surface est plus petite, et le mélange du mercure chaud avec le mercure plus froid du récipient est moins facile. Pour des dimensions suffisantes du récipient cathodique et une section suffisamment faible de l'étranglement, la lampe peut fonctionner très longtemps sans interruption.

Les caractéristiques de la lampe dépendent, en premier lieu, de la quantité de vapeur émise par les électrodes, quantité qui dépend, toutes les autres conditions restant les mêmes, du refroidissement plus ou moins rapide des électrodes. Mieux celles-ci sont refroidies, et plus est élevée l'intensité de courant de la lampe. Pour permettre de charger fortement des lampes de petit modèle, nous avons muni les récipients des électrodes de celles-ci d'enveloppes réfrigérantes métalliques. Les lampes employées étaient placées sur un support et amorcées au moyen d'un court-circuit préalable produit par un mouvement de bascule : elles pouvaient fonctionner sous une différence de potentiel comprise entre 25 et

(¹) Publié par les *Drudes Annalen*, juillet 1906.

400 volts, pourvu que les parois présentassent une solidité suffisante pour pouvoir résister à une pression d'environ 4 atmosphères. Généralement, la lampe n'était chargée que jusqu'à 200 volts.

La plupart des mesures étaient faites sur le réseau a 220 volts avec intercalation d'une résistance de 50 ohms : pour quelques mesures, on opéra sous une tension de 330 volts ou de 500 volts : d'autres furent effectuées sur 110-120 volts. La résistance en série permettait de faire fonctionner la lampe au régime voulu sous l'une de ces tensions.

Après l'amorçage, de même qu'après un changement de régime, il faut toujours un certain temps pour que l'état d'équilibre soit obtenu et que l'intensité de courant et la différence de potentiel aux bornes de la lampe présentent des valeurs constantes.

Quand la lampe est peu chargée, l'arc remplit toute la section du tube. Quand la charge augmente, l'arc se resserre de plus en plus et forme finalement un fil de 5 millimètres de diamètre.

Le tableau I indique les valeurs de la pression de vapeur correspondant aux différentes charges. Ces pressions étaient mesurées au moyen d'un tube de deux mètres de longueur soudé au récipient anodique.

TABLEAU I

VOLTS	AMPÈRES	PRESSION en cm. DE MERCURE
36	2,78	0,2
40	3,15	0,6
60	4,10	3,8
67	4,20	9,0
87	4,30	14,0
96	4,50	19,1
114	4,50	29,5
122	4,60	35,10
132	4,50	42,6
140	4,80	47,7
154	4,80	58,7
163	4,80	67,0
174	4,80	76,5
181	4,75	82,7
188	4,80	89,0
196	4,80	96,5
202	4,80	100,5
150	5,05	60,8
178	4,75	82,0
201	4,60	104,0
220	4,45	121,0
237	4,50	138,0
249	4,40	150,0

La portion centrale du tube, pour une charge de 600 à 700 watts pour laquelle la pression de la vapeur n'est que de 80 centimètres environ, est rouge sombre. Il en résulte que l'on a affaire, dans cette portion de la lampe, à de la vapeur non saturée, car la température moyenne de l'arc doit évidemment être encore plus élevée que celle des parois.

De ce qui précède, on voit que, dans ces nouvelles lampes, les conditions sont complètement différentes de celles dans lesquelles ont été faites les études antérieures sur l'arc au mercure : la pression atteint plusieurs atmosphères et la température moyenne de l'arc est très élevée.

Mesures photométriques.

Radiation visible totale. — La mesure de la radiation visible totale fut faite sur un banc photométrique de 4 mètres de longueur. La lampe de comparaison était une lampe à mercure du même modèle fonctionnant sous une différence de potentiel constante moyenne. L'intensité lumineuse absolue de cette lampe avait été déterminée par comparaison avec une lampe à incandescence étalonnée. Cette détermination avait été faite au moyen d'un photomètre à scintillation de Schmidt et Haensch à cause de la coloration différente des deux sources lumineuses : pour la comparaison de la lampe étudiée avec la lampe à mercure de comparaison, on se servait d'un appareil photométrique de Martens. On mesurait la radiation perpendiculairement à l'axe du tube lumineux.

Les tableaux II et III indiquent les résultats de deux séries de mesures et donnent les intensités lumineuses en bougies Hefner et la consommation spécifique en watts par bougie Hefner.

On voit, d'après les chiffres de ces tableaux, que la consommation spécifique de la lampe commence d'abord par augmenter avec la charge : ce fait concorde avec toutes les obser-

vations antérieures faites sur des lampes à mercure peu chargées. Pour une charge de 100 watts environ, la consommation spécifique atteint un maximum : ensuite, la courbe de consommation spécifique en fonction de la charge tombe rapidement, puis s'aplatit peu à peu pour devenir presque parallèle à l'axe des abscisses, mais sans perdre la tendance tombante aux valeurs les plus faibles atteintes.

TABLEAU II

VOLTS	AMPÈRES	WATTS	BOUGIES	CONSOMMATION SPÉCIFIQUE Watts/bougies.
27	1,90	51,3	66,0	0,778
30	2,20	66,4	76,7	0,866
34	2,60	88,3	94,6	0,934
44	2,87	126	137	0,922
56	3,20	179	224	0,799
69	3,36	232	357	0,653
96,5	3,52	340	860	0,395
121	3,67	444	1 560	0,284
139	3,70	513	2 055	0,251
157	3,70	580	2 600	0,223
164	3,75	615	2 930	0,210
175	3,80	665	3 180	0,209
235	3,90	917	5 040	0,182
283	3,85	1 090	6 350	0,172
304	3,85	1 170	7 130	0,165

TABLEAU III

VOLTS	AMPÈRES	WATTS	BOUGIES	CONSOMMATION SPÉCIFIQUE Watts/bougies.
48	4,31	207	222	0,934
63	4,68	295	444	0,664
73	4,84	353	676	0,523
114	4,82	549	1 900	0,288
145	4,78	694	2 980	0,233
179	4,68	840	4 250	0,197
206	4,60	946	5 140	0,184
221	4,50	992	5 540	0,179
233	4,50	1 050	6 080	0,173
251	4,45	1 115	6 460	0,173

On peut remarquer d'abord, dans ces résultats, que nous avons obtenu la plus grande production de lumière atteinte jusqu'à présent. Les mesures n'ont été faites que dans la direction de la radiation maxima de lumière. D'après une mesure de l'Institut physico-technique (Technische Reichanstalt), la radiation lumineuse maxima de la lampe est égale à 27/24 fois la radiation moyenne. Pour 3,85 ampères et 304 volts, on trouve donc, pour l'intensité lumineuse moyenne, une consommation spécifique de 0,185 watt par bougie Hefner, valeur que l'on pourrait abaisser encore sensiblement avec des lampes de plus grand modèle permettant de mettre en jeu plus d'énergie.

Il est particulièrement intéressant de constater que la courbe de consommation spécifique présente un maximum : cela tient sans doute à ce que, à partir de ce point, l'augmentation du rendement de la radiation due à la température est beaucoup plus rapide que la diminution du rendement de la radiation due à la luminescence : le rendement total augmente alors rapidement.

La colonne lumineuse positive de l'arc obéit aux mêmes lois que celle de l'effluve : les résultats de nos mesures confirment les mesures bolométriques faites par Angström sur des tubes de Geissler. Ce physicien a été conduit à l'hypothèse que la radiation du gaz lors d'une décharge électrique se compose de deux parties, l'une de nature régulière, l'autre de nature irrégulière : quand la tension diminue, la première diminue et la seconde augmente d'autant plus que les mouvements à travers la masse gazeuse sont moins amortis. En outre, il a émis l'hypothèse que, si l'on augmente la pression du gaz, les conditions de vaporisation varient considérablement, la radiation anormale est transformée plus facilement en radiation normale, et la radiation devient plus riche en rayons ultra-rouges.

Dans notre lampe, nous avons d'abord à faible charge une radiation visible irrégulière et une radiation régulière ultra-rouge. Quand la pression augmente, la radiation régulière croît de plus en plus. Pour une température moyenne relativement basse, on obtient d'abord comme résultat un accroissement de la consommation spécifique. Pour une température moyenne plus élevée, la radiation régulière se rapproche de la région visible et, par suite du déplacement de l'énergie principale vers les ondes courtes quand la température augmente, on atteint finalement, pour la radiation régulière visible, une consommation spécifique si faible que la radiation totale présente une diminution de la consommation spécifique.

Radiation ultraviolette. — Les résultats de mesures photométriques faites sur la radiation visible totale nous ont engagés à étudier aussi la variation de la radiation ultraviolette avec l'augmentation de la charge de la lampe. Pour mesurer l'intensité de la radiation ultraviolette pour différentes charges, nous avons eu recours à la propriété qu'ont les rayons ultraviolets de décharger les corps chargés négativement. Le dispositif expérimental était semblable à celui employé par Lenard, et la décharge était observée dans un vide très poussé. La grande intensité produite par la lampe permettait d'employer, pour la mesure du courant de dispersion, un galvanomètre à miroir. Le tube à vide cylindrique employé pour la mesure était en quartz et avait 30 millimètres de diamètre et 120 millimètres de longueur. Les électrodes en forme de disques étaient en aluminium et avaient 20 millimètres de diamètre : la distance entre électrodes était de 15 millimètres. Le dispositif expérimental était le suivant : la lampe à mercure était placé dans un coffret en carton d'amiante muni d'une ouverture. Devant cette ouverture était placé un diaphragme, et, derrière ce diaphragme, le tube à vide, dont la cathode seule était atteinte par les rayons. La distance entre la lampe et le tube à vide était de 11 centimètres. Le tube à vide était relié à une batterie à 120 volts : un galvanomètre de Siemens et Halske à miroir était mis en circuit au moyen d'un commutateur à godets permettant de renverser le sens du courant dans ce galvanomètre. Un déplacement de 1 division sur l'échelle placée à $1^{m},50$ de l'appareil correspondait à un courant de $2,8 . 10^{-10}$ ampères. Le tube à vide était relié à une pompe tournante à mercure de Kauffmann : il était chauffé à plusieurs reprises pendant le vidage, qu'on poussait jusqu'à ce qu'aucune décharge d'une bobine d'induction ne traversât plus le tube.

Pour vérifier d'abord la constance de la sensibilité de l'appareil, on fit une série de mesures pour une radiation constante de la lampe, qui fonctionnait alors sur le courant d'une batterie d'accumulateurs. Les résultats sont indiqués par le tableau IV.

TABLEAU IV

CHARGE DE LA LAMPE A MERCURE				INTENSITÉ	CONSOMMATION SPÉCIFIQUE
Temps en minutes.	Volts.	Ampères.	Watts.	Déviation α du galvanomètre.	Watts/α.
0	81	2,82	228	51,5	4,43
3	81	2,85	231	51,8	4,46
6	81	2,87	232	52,0	4,46
9	81	2,87	232	52,0	4,46
12	80,5	2,87	230	52,5	4,39
15	80,5	2,87	231	52,5	4,40
18	80,5	2,86	230	52,0	4,43

On voit que, pendant la durée de l'expérience, la sensibilité est restée constante et qu'il n'y a pas de phénomène de fatigue. Pendant ces mesures, une plaque de verre fut intercalée plusieurs fois entre la lampe et le tube à vide, et, chaque fois, la déviation revint à zéro.

Une seconde série de mesures fut faite pour étudier le courant de saturation. Pour un courant constant dans la lampe à mercure, on fit varier la différence de potentiel aux bornes du tube à vide entre 0,012 et 120 volts et on lut les déviations du galvanomètre. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau V.

TABLEAU V

Charge de la lampe à mercure : 91 volts, 2,96 ampères.

DIFFÉRENCE DE POTENTIEL AUX BORNES en volts.	DÉVIATIONS DU GALVANOMÈTRE
0,012	13,3
0,024	13,9
0,06	15,5
0,12	17
0,24	24,5
0,6	40,5
1,2	56,8
2,4	64,7
6	69,0
12	70
24	73,2
60	78,5
84	81,5
120	83

Dans toutes les mesures suivantes, nous avons toujours employé une différence de potentiel de 120 volts aux bornes du tube à vide, le courant de saturation étant obtenu avec une approximation suffisante pour cette différence de potentiel.

Après ces expériences préliminaires, dont le résultat montrait que le dispositif expérimental employé ne présentait aucune source d'erreurs, nous avons mesuré l'intensité de la radiation ultraviolette de la lampe en fonction de la charge, en modifiant progressivement cette dernière et en lisant, après obtention de chaque état stationnaire, les déviations correspondantes du galvanomètre. Le tableau VI indique les résultats obtenus dans ces mesures. Si l'on trace la courbe de consommation spécifique relative à la radiation ultraviolette, on constate que cette courbe a tout à fait le même caractère général que celle relative à la radiation visible : le maximum est décalé vers les charges plus fortes, ce qui veut dire qu'il n'atteint pas une température et une pression plus élevées que le maximum de radiation visible. D'après l'hypothèse précédente, cela signifie que la part de la radiation régulière dans la radiation totale de la lampe n'est sensible, dans l'ultraviolet, que pour une charge plus élevée que dans la partie visible du spectre.

Mesures d'intensité sur le spectre de la lampe. — L'aspect extérieur de la lampe montrait déjà, d'une façon simple, que la couleur de la lumière varie sensiblement quand la charge augmente. La lumière devient jaune et perd son caractère vert : en outre elle contient très évidemment des rayons rouges. L'examen du spectre de la lampe montre que, à côté du spec-

tre de raies, il apparaît un spectre continu dont l'intensité croît avec la charge. Le spectre de raies que présente la lampe à faible charge est le spectre connu de la lampe d'Arons. Quand la charge augmente, les rapports des intensités des différentes raies varient très sensiblement.

TABLEAU VI

CHARGE DE LA LAMPE A MERCURE			INTENSITÉ DE LA RADIATION ultra-violette.	CONSOMMATION SPÉCIFIQUE
Volts.	Ampères.	Watts.		
36	2,03	73,1	28,2	258
36	2,23	80,5	29,8	269
37	2,31	85,3	30,2	283
38	2,40	91,3	30,3	301
39,5	2,50	98,7	30,7	322
42	2,66	111,5	31,8	351
44	2,73	120,5	31,8	378
46	2,79	128,5	32,1	401
48	2,86	137,0	32,4	422
51,5	2,91	150,0	33,9	442
56	2,90	162	36	451
61	2,90	177	39,2	452
65	2,90	189	42,7	443
69	2,92	202	46,8	430
72	2,92	210	50,5	417
75,5	2,93	222	55,0	403
79	2,95	233	59,9	389
64	2,81	179,5	40,2	447
77	2,94	227	55,8	406
89	2,93	261	71,4	365
100	3,03	303	99,0	307
110	3,03	337	126,5	267
125	3,06	382	176	217
135	3,04	410	214,5	191
149	3,12	465	294	158
162	3,12	505	353	143
172	3,13	538	390	136

Nous avons fait sur le spectre continu et sur le spectre de raies une série de mesures d'intensité à différentes charges.

a) *Spectre continu.* — La variation d'intensité fut d'abord mesurée dans le spectre continu pour trois longueurs d'ondes sous une charge croissante. Les comparaisons étaient faites avec le spectre d'une lampe Nernst fonctionnant sous une différence de potentiel constante. Dans un spectroscope d'Hoffmann à vision directe, on superposait les deux spectres au moyen d'un prisme de comparaison.

Entre la lampe à mercure et la fente, était placé un ensemble de nicols permettant, par rotation du nicol le plus voisin de la source lumineuse, d'affaiblir l'intensité du spectre. Une fente située dans l'oculaire permettait de découper une bande de deux spectres que l'on amenait au même éclat par la rotation d'un nicol. Les valeurs indiquées dans les tableaux suivants sont calculées d'après l'angle de rotation. Les longueurs d'ondes choisies

TABLEAU VII *a*

λ = 5 461 unité Angström.

Watts	32,5	45,5	82	132	187	263	326	405	442
Intensité	11,5	15,0	20,7	31,9	45,8	91,7	126	197	231

TABLEAU VII *b*

λ = 4 359 unité A.

Watts	34,8	40,3	54,4	70,0	107	156	205	252	289	322	377	442
Intensité	11,0	12,6	16,9	19,5	23,8	37,7	60,0	81,3	101	124	176	228

TABLEAU VII *c*

λ = 4 047 A.

Watts	36,8	49,6	72,8	110	158	210	277
Intensité	11,7	16,6	19,5	26,7	39,2	63	99

TABLEAU VII *d*

λ = 5 790 A.

Watts	36	44,5	68,7	104	131	160	190	248	293	365	436
Intensité	10,5	16,3	21,9	29,4	44,3	65,6	109	155	291	563	755

TABLEAU VII *e*

λ = 4916 A.

Watts	30,6	40,0	72,6	107	178	202	255	307	357
Intensité	10,0	12,5	17,8	25,7	60,0	75,3	133	223	322

TABLEAU VII *f*

λ = 6 908 A.	Watts	»	154	205	259	298	324
	Intensité	»	62	107,3	180	308	370
λ = 6 234.	Watts	111	136	179	238	272	»
	Intensité	29,8	53,5	95	160	213	»
λ = 4 960.	Watts	120	152	189	246	310	361
	Intensité	40	61	89	175	307	483
λ = 4 348.	Watts	104	142	207	261	332	»
	Intensité	26	50	119	201	375	»
λ = 4 078.	Watts	»	155	189	230	280	301
	Intensité	»	60	93,4	153	222	252

TABLEAU VII *g*

λ = 5 679 A.

Watts	85	110	180	237	282
Intensité	23	35,5	66,1	122	163

pour les mesures étaient aussi éloignées que possible des raies de plus grande intensité; c'étaient

$$\lambda = 445\,\mu\mu; \qquad \lambda = 473\,\mu\mu \qquad \text{et} \qquad \lambda = 645\,\mu\mu.$$

Les courbes isochromatiques pour ces trois longueurs d'ondes montrent que, conformément aux résultats précédents, il se produit un plus rapide accroissement de l'intensité pour les ondes courtes.

b) *Spectre de raies.* — Les mesures d'intensité du spectre de raies furent faites avec le même dispositif expérimental que les précédentes. Au lieu de la lampe Nernst, on employa une seconde lampe à mercure fonctionnant sous une différence de potentiel constante.

On mesura les intensités de 11 raies de mercure à différentes charges, avec une unité arbitraire, différente pour chacune des raies. Si, pour chacune des raies, on prend pour intensité de cette raie I = 20 pour une charge de 75 watts environ, on obtient comme résultats les valeurs données dans les tableaux VII (*a, b, c, d, e, f, g*).

On voit, d'après ces chiffres, que l'accroissement d'intensité avec l'augmentation de charge est différente pour les différentes raies, et que différents groupes de raies présentent un même accroissement d'intensité, mais un accroissement différent de groupe à groupe.

Les raies $\lambda = 5461$, 4359 et 4047 unités Angström, qui présentent entre elles le même accroissement d'intensité, sont des raies de série et forment le premier triplet de la seconde série.

Les raies $\lambda = 6908, 6234, 5790, 4960, 4348, 4078$ présentent aussi entre elles le même accroissement d'intensité. Elles deviennent toutes indistinctes aux charges élevées et, autant que l'on a pu en juger par l'expérience, décomposées en un triplet par un champ magnétique. Tandis que l'intensité du groupe précédent devient sept fois plus considérable pour une augmentation de la charge de 100 à 400 watts, l'intensité de ce groupe devient 23 fois plus considérable pour la même augmentation de charge.

En ce qui concerne la raie 4960 appartenant au groupe, J. Stark a indiqué que, au point de vue de son action photographique, elle est très sensible à une variation de la température moyenne. En comparant les intensités de radiations des raies 4078 et 4047 pour la même vitesse de translation dans les rayons-canal, Stark a trouvé que l'intensité de radiation de la raie 4078 est beaucoup plus faible aux faibles vitesses que celle de la raie 4047, et qu'elle atteint seulement aux grandes vitesses une valeur suffisante pour pouvoir être décelée photographiquement.

Les raies $\lambda = 5679$ et 4916, dont l'accroissement est compris entre ceux des deux premiers groupes, présentent des augmentations égales d'intensité. Elles ne sont cependant pas de même nature. La raie 5679 appartient aux raies qui apparaissent dans le spectre d'étincelles et dans le faisceau cathodique de l'arc. La raie 4916 n'appartient pas aux raies qui apparaissent dans le faisceau cathodique: elle présente d'ailleurs, d'après des recherches antérieures, des propriétés différentes.

Résumé.

En résumé, l'étude de cette nouvelle lampe à vapeur de mercure en quartz, dans laquelle l'arc est produit sous une pression élevée (plusieurs atmosphères), a permis d'établir les faits suivants:

a) Les courbes de consommation spécifique de la radiation visible et de la radiation ultraviolette présentent chacune un maximum;

b) La consommation moyenne spécifique pour la radiation visible s'abaisse jusqu'à 0,185 watt par bougie Hefner ;

c) L'intensité de la radiation ultraviolette croît plus rapidement avec la charge que celle de la radiation visible ;

d) Dans le spectre continu, les ondes les plus courtes croissent plus vite que les ondes les plus longues ;

e) Les raies spectrales présentent, par groupes, un accroissement différent de l'intensité [1].

R. Küch et T. Retschinsky.

UTILISATION DES GAZ DES HAUTS FOURNEAUX. — INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES DE PORTOFERRAJO

On sait quel intérêt considérable présente l'utilisation des gaz des hauts fourneaux [2] et des fours à coke qui, au moyen de groupes électrogènes, peuvent fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement de toute l'installation et même présenter une source de bénéfices par l'énergie électrique supplémentaire vendue à des consommateurs distincts de l'usine. On a pu dire que, dans des conditions favorables, le métal pourrait être considéré comme un sous-produit, c'est pourquoi il semble intéressant de décrire très rapidement les installations effectuées tout récemment par la compagnie Westinghouse aux hauts fourneaux de la société Elba.

Ces hauts fourneaux sont établis à Portoferrajo, dans l'île d'Elbe : le minerai est extrait sur place et le charbon est amené d'Angleterre. L'usine est établie sur le bord de la mer, ce qui permet des communications faciles et économiques.

L'installation comprend deux hauts fourneaux produisant respectivement 200 et 350 tonnes de fonte par jour. Ces fourneaux sont desservis par huit appareils de Cowper-Cowles et par une soufflerie comprenant deux machines à vapeur de 1 200 chevaux, une machine à gaz de 1 500 chevaux et deux machines à gaz de 600 chevaux. Le fourneau de 200 tonnes possède six tuyères de 14 centimètres de diamètre, et le fourneau de 350 tonnes douze tuyères semblables. On fabrique du coke dans une batterie de 104 fours répartis en deux groupes de 52 : ces appareils produisent 320 tonnes de coke par jour : le coke sert à l'alimentation des hauts fourneaux.

Un petit chemin de fer sert à transporter la fonte au pont d'embarquement : le laitier est transporté à quelque distance au moyen d'une locomotive électrique et servira à fabriquer du ciment et des briques.

Les gaz des hauts fourneaux et des fours à coke sont employés, soit directement dans des moteurs à gaz, soit indirectement au chauffage des chaudières qui desservent des machines à vapeur.

La salle des machines, qui a 107 mètres de longueur, contient, outre les machines soufflantes dont il a été question, les groupes électrogènes produisant le courant nécessaire aux différents services de l'usine. Parmi ces groupes, il y a trois groupes à courant continu de

(1) Ces études ont été faites au laboratoire de la maison Heraeus.

(2) Voir dans l'*Eclairage Electrique* du 18 mars 1899, tome XVIII, l'article de M. Witz : *Les stations centrales des hauts fourneaux*.

100 kilowatts sous 250 volts, composés chacun d'une dynamo génératrice hexapolaire et d'un moteur à gaz de 200 chevaux entraînant celle-ci par courroie, un groupe de 200 kilowatts composé d'une dynamo compound à 250 volts entraînée par une machine à vapeur de 350 chevaux et enfin un groupe de réserve comprenant une dynamo compound de 350 kilowatts commandée par un moteur à gaz.

Les gaz des hauts fourneaux actionnant les moteurs à gaz ou servant au chauffage des chaudières passent dans trois épurateurs Theisen ; l'un d'eux, commandé par un moteur de 50 chevaux, purifie les gaz allant aux chaudières ; les deux autres, actionnés chacun par un moteur de 100 chevaux, purifient les gaz qui alimentent les moteurs des groupes électrogènes et ceux des machines soufflantes.

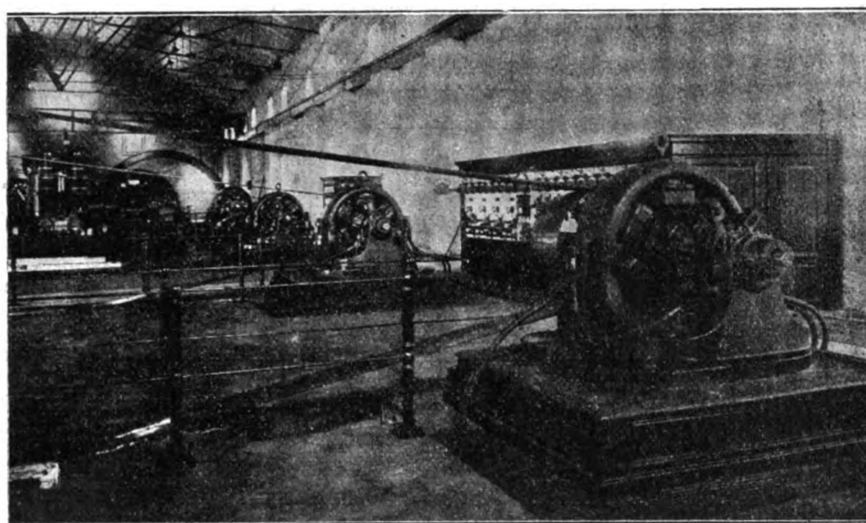


Fig 1. — Salle des Machines : Génératrices Westinghouse.

La chaufferie comporte dix chaudières : six d'entre elles sont du type Cornwall à deux foyers, présentant une surface de chauffe de 100 mètres carrés et sont chauffées par les gaz des fours à coke. Les quatre autres, multitubulaires avec une surface de chauffe de 265 mètres carrés, sont alimentées par le gaz des hauts fourneaux et peuvent également fonctionner avec du charbon.

Les moteurs à gaz de 200 chevaux sont monocylindriques, à quatre temps et à simple effet. Leur réglage est fait par la méthode du tout ou rien. Le cylindre a 850 millimètres de diamètre et le courant est de 1 mètre. La vitesse de rotation est de 150 tours par minute. Le volant, de 4^{m},50 de diamètre, porte sur sa jante une courroie qui entraîne la dynamo génératrice correspondante placée à 11^{m},50 du moteur. Pour la mise en marche, on emploie de l'essence, et l'on démarre au moyen d'un treuil à main.

Le moteur du groupe de réserve, actuellement en montage, est à deux cylindres à double effet disposés en tandem. Il est directement accouplé à la dynamo génératrice de 350 kilowatts. Pour le démarrage, on emploie de l'air comprimé à 20 kilogrammes que fournit un compresseur commandé par un moteur de 20 chevaux.

La machine à vapeur de 350 chevaux possède une distribution par soupapes équilibrées : elle tourne à une vitesse de 82 tours par minute, et entraîne par courroie la génératrice

qui tourne à une vitesse de 450 tours par minute. Cette machine travaille à condensation : le condenseur à surface est placé en sous-sol, comme ceux des machines soufflantes de 1 200 chevaux. Les machines à vapeur ont été prévues surtout pour les mises en marche de l'usine, de façon à éviter l'installation de gazogènes.

Le tableau de distribution comprend, outre les cinq panneaux de génératrices, un panneau de charge et six panneaux de feeders.

L'éclairage est assuré par 45 lampes à arc et 650 lampes à incandescence.

L'énergie électrique produite sert à l'alimentation d'un certain nombre de moteurs.

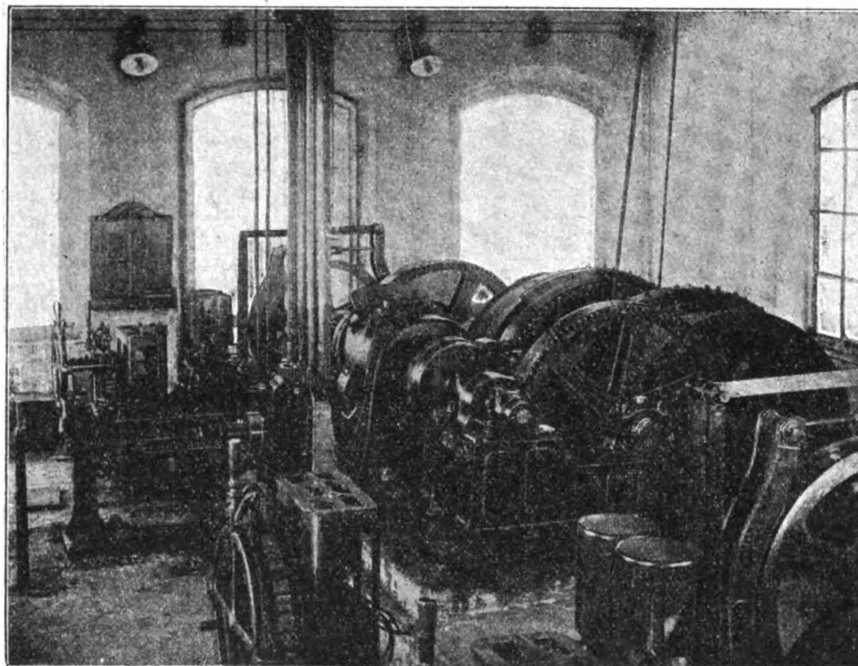


Fig. 2. — Treuil du Monte-charges.

Deux monte-charges (fig. 2) sont actionnés par des moteurs de 55 chevaux : ces monte-charges montent le minerai, la castine et le coke pour le chargement des hauts fourneaux : la hauteur est de 28 mètres et le poids de matières élevées est de 2 300 tonnes par 24 heures. Les moteurs, entièrement cuirassés comme les moteurs de traction, atteignent, au moyen de manchons, les trains d'engrenages des monte-charges. Deux tambours portent les câbles des monte-charges. Le réglage de la vitesse des moteurs est assuré par des controllers à soufflage magnétique.

Les pompes qui fournissent l'eau nécessaire à toute l'installation sont réunies en quatre groupes comprenant chacun deux pompes en tension (fig. 3). Un groupe peut élever 250 mètres cubes d'eau de mer par heure à une hauteur de 30 mètres. Chaque groupe est entraîné par un moteur de 60 chevaux tournant à une vitesse de 850 tours par minute : l'attaque directe des pompes est effectuée par des manchons élastiques.

Une nouvelle pompe centrifuge, actuellement en montage, est entraînée par un moteur de 100 chevaux. Toute l'eau de mer ainsi fournie est utilisée pour refroidir les tuyères et les bâches des hauts fourneaux, pour les condenseurs et pour les moteurs à gaz.

L'eau douce d'alimentation des chaudières est prise dans un puits situé à 4 kilomètres de

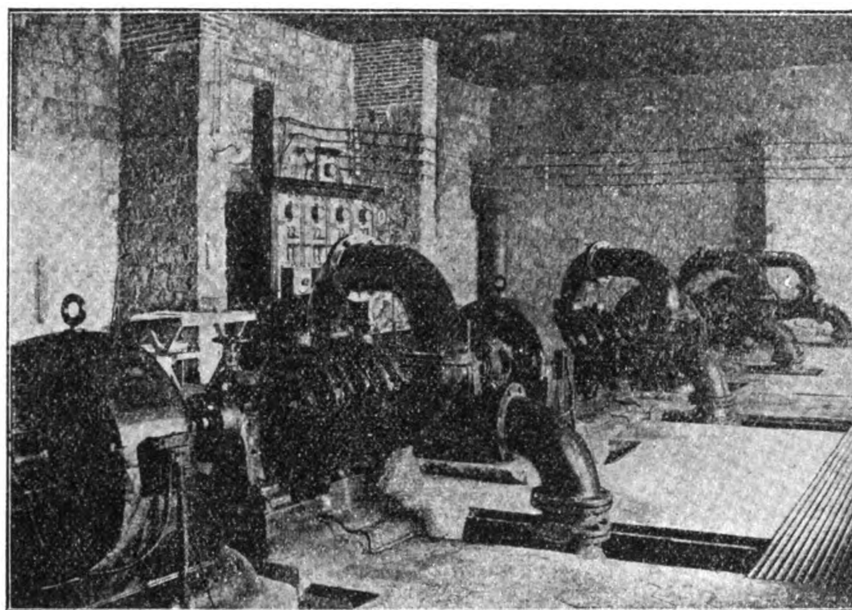


Fig. 3. — Installation des Pompes.

l'usine. Cette eau est aspirée et refoulée par une pompe à trois pistons plongeurs qu'entraîne un moteur asynchrone triphasé de 40 chevaux à 1 000 volts. Ce moteur est alimenté

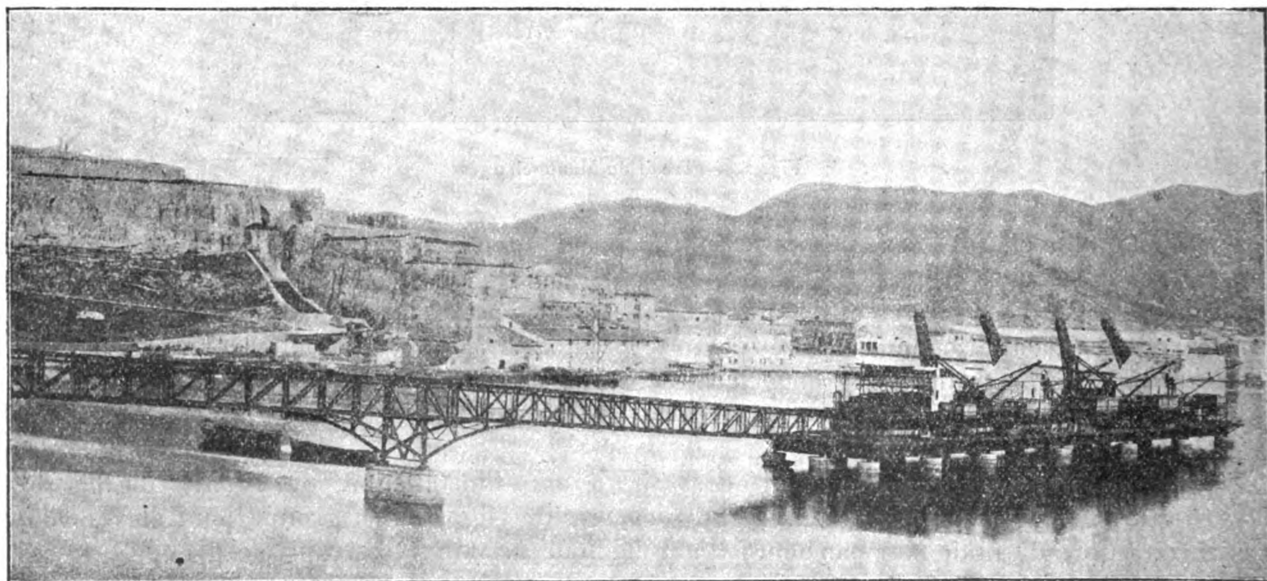


Fig. 4. — Pont de déchargement du charbon et du minerai.

par une commutatrice de 45 K. V. A. située dans l'usine génératrice qui transforme le courant continu à 250 volts en courants triphasés à 165 volts : la tension est élevée à 1 200 volts

par un groupe de trois transformateurs monophasés et l'énergie électrique est transmise à la pompe des puits par une petite ligne aérienne.

Un pont de déchargement, construit en fer et en bois (fig. 4), sert au déchargement du charbon et au chargement de la fonte. Un rail suspendu, portant des wagonnets que déplace un câble tracteur, forme un chemin de fer aérien de 1 200 mètres de longueur. Les wagonnets, espacés à 20 mètres les uns des autres, sont entraînés à la vitesse de 75 centimètres par minute par un câble qui passe sur un cabestan, commandé par un moteur compound de 50 chevaux. Ce moteur, à 220 volts, tourne à une vitesse de 900 tours par minute, vitesse réduite à 6,34 tours par minute par une transmission et des engrenages. Deux autres moteurs compound de 50 chevaux placés sur le pont actionnent chacun quatre grues ; deux grandes pour le déchargement du charbon et deux petites pour le déchargement du minerai. La vitesse de rotation de ces moteurs est réduite à 135 tours par deux arbres intermédiaires : ce deuxième arbre commande, par l'intermédiaire d'une courroie, quatre treuils dont les tambours ont une vitesse de rotation de 27 tours par minute. Chaque treuil est muni d'un accouplement à traction et peut soulever 2 tonnes. Le pivotement des grues est fait à la main ; la descente des charges se fait au frein. Les grandes grues ont une portée de 16 mètres ; les bennes sont équilibrées par des contrepoids.

A. Solier.

REVUE INDUSTRIELLE ET SCIENTIFIQUE

THÉORIES ET GÉNÉRALITÉS

Sur quelques propriétés des rayons α du radiothorium. — **O. Hahn.** — *Physikalische Zeitschrift*, 1er juillet 1906.

Dans la publication précédente faite par l'auteur sur ce sujet (1), il s'agissait des propriétés des particules α du dépôt actif du thorium. L'auteur a montré que, en plus du thorium A, ce dépôt se compose de deux produits de rayons α, le thorium B et le thorium C, qui possèdent pour l'air et d'autres substances des pouvoirs d'ionisation différents. La publication actuelle est consacrée à l'étude des pouvoirs d'ionisation des autres produits de rayons α du thorium, le thorium X, le radiothorium et l'émanation du thorium. La méthode employée était très semblable à celle de Bragg et Kleeman pour les différents produits α du radium.

Dans le cas présent, on se heurte à quelques difficultés. Deux conditions principales doivent être remplies pour que l'on obtienne des courbes d'ionisation nettement délimitées :

La substance étudiée doit former une couche extrêmement mince, pour que toutes les particules α atteignent l'air sans subir une absorption sensible dans la substance active.

Cette couche mince doit être fortement radioactive pour que l'effet obtenu sur l'électromètre, lorsqu'on emploie une petite chambre d'ionisation, soit suffisamment grand.

En ce qui concerne l'activité des préparations de thorium étudiées, celle-ci était environ le millième de celle de bromure de radium pur : on ne pouvait donc pas s'attendre à des résultats aussi exacts pour le radiothorium que pour le radium. Une autre difficulté réside dans le dégagement de l'émanation qui est abondant même pour les préparations solides de radiothorium. La présence de particules α provenant de cette émanation peut, si l'on n'y prend pas garde, rendre les courbes d'ionisation peu claires et impropres à l'étude du pouvoir d'ionisation des différents groupes de rayons.

Pour éviter l'effet de l'émanation, l'auteur a placé la substance active sur un petit auget au lieu de la placer sur une petite table. Sur cet auget était disposé un couvercle plat en porcelaine ou en platine recouvert d'une couche mince de la substance active de telle façon qu'il

(1) Voir *Éclairage Electrique*, tome XLVIII, 21 juillet 1906, page 102.

ne fût en contact avec aucune paroi de l'auget. La partie inférieure de l'auget était reliée, au moyen d'un tube de caoutchouc, à une trompe à eau au moyen de laquelle on établissait à travers l'auget un courant d'air permanent dirigé vers le bas : ce courant d'air entraînait l'émanation aussitôt qu'elle était produite par la substance active, et empêchait ainsi la diffusion de celle-ci vers le haut.

Pour de grandes distances entre la source de radiations et la chambre de mesure, ce dispositif a été reconnu très satisfaisant. Pour de faibles distances, on ne parvenait pas à éviter les perturbations provenant de l'émanation : il était nécessaire de recouvrir la substance active d'une feuille mince uniforme de mica, dont on mesurait, par une expérience préalable, l'effet sur les rayons α comparé à celui de l'air.

La détermination exacte du pouvoir d'ionisation des particules α émises par les différents produits du thorium n'est pas facile pour les raisons indiquées, mais les expériences ayant été répétées plusieurs fois, la plupart du temps avec des substances nouvellement préparées et dans des conditions variées, les résultats finaux obtenus doivent peu différer de la réalité.

Comme première courbe d'ionisation, l'auteur a tracé celle d'une préparation de radium énergique en équilibre radioactif. Quelques gouttes d'une solution de radiothorium (activité 100 000) furent vaporisées sur un petit couvercle plat en porcelaine. La couche obtenue était suffisamment mince. Si l'on suppose que les particules α de chacun de cinq produits différents existant sur le radiothorium possèdent un pouvoir de pénétration différent pour l'air, on doit s'attendre théoriquement à ce que la courbe d'ionisation présente cinq coudes bien déterminés. Or les courbes obtenues par l'auteur ne présentent que deux parties nettement distinctes. La partie supérieure de la courbe, commençant pour $8^{cm},6$ environ, indique la présence de thorium C dont la région d'ionisation atteint, comme on l'a vu, $8^{cm},6$. Un peu au-dessous de 6 centimètres, on voit entrer en jeu un second groupe de particules α : le point où cela se produit n'est cependant pas nettement marqué. La projection de la première portion de la courbe sur l'axe des abscisses indique la part d'ionisation qui provient du thorium C seul ; la projection du reste de la courbe indique la part d'ionisation due aux cinq produits ensemble. La somme de deux projections est plus de dix fois supérieure à la première projection : théoriquement elle devrait être cinq fois plus grande si les cinq produits successifs sont tous présents. La différence entre la théorie et l'expérience montre que la moitié au moins de l'émanation produite dans la préparation se disperse dans l'air.

L'absence de coudes prononcés (exception faite pour le thorium C) rend impossible la détermination, d'après cette courbe, du pouvoir d'ionisation des différents groupes de rayons α correspondant aux différents produits.

La courbe relevée avec une couche épaisse de substance radioactive n'a pas donné de résultats plus satisfaisants et ne permet pas, non plus, de distinguer entre les différents composants. Il était donc nécessaire de parvenir à préparer chacun des produits individuels de rayons α aussi isolé que possible et de déterminer ensuite le pouvoir d'ionisation des particules α émises par chacun de ces produits. Cette méthode, quoiqu'un peu pénible, conduisit à de bons résultats.

Courbe d'ionisation du radiothorium seul. — L'auteur a d'abord tracé la courbe du radiothorium seul, débarrassé provisoirement de tous ses produits. La préparation de radiothorium employée n'était pas très active au début ; elle contenait une forte portion de fer et d'autres impuretés. Pour obtenir une préparation ne contenant pas de thorium X ni de corps inactifs, on procède de la façon suivante : la solution fut à peu près neutralisée avec de l'ammoniaque. Un faible dépôt se précipita ; une grande partie de thorium X ou de fer resta en solution. Après filtrage, le dépôt fut dissous dans l'acide nitrique et la solution fut plusieurs fois traitée comme précédemment. On n'employait que la quantité d'ammoniaque nécessaire pour qu'une faible portion seulement du dépôt précédent se déposât à nouveau, la majeure partie restant en solution. Le dernier dépôt, à peine visible, était dissous au moyen d'acide nitrique que l'on évaporait sur un couvercle en porcelaine : la couche obtenue était extrêmement mince et présentait une activité α relativement forte.

La courbe d'ionisation était tracée immédiatement après achèvement de la préparation de la substance active. Cette courbe présente la forme que l'on devait attendre pour un produit isolé.

L'action d'ionisation des particules α commence à $3^{cm},9$, croit ensuite très rapidement, atteint un maximum et diminue enfin peu à peu, quand la distance de la source de radiations continue à décroître. Une autre courbe, relevée trois heures après, présente le même résultat. On doit en conclure que les particules α du radiothorium cessent d'ioniser l'air à une distance de $3^{cm},9$ environ. Une seconde courbe, relevée avec la même préparation quatre jours plus tard, présente une forme très différente. La première action ionisante des rayons α commence déjà pour une distance beaucoup plus grande, $8^{cm},6$ environ. Cet effet provient, d'après l'étude antérieure de l'auteur, des rayons du thorium C. Il se manifeste, peu au-dessous de 6 centimètres, une modification de la courbe d'ionisation prouvant qu'un nouveau produit ajoute son action à celle du thorium C. Les rayons de ce corps possèdent un pouvoir de pénétration plus faible que ceux du thorium C, mais plus grand que ceux du thorium B et du radiothorium. Comme il ne reste que le thorium X et l'émanation, on peut conclure que la modification observée au-dessous de 6 centimètres dépend de l'un des deux ou des deux. Une grande partie de l'émanation se dégageant de la préparation et étant entraînée par le courant d'air, il semble vraisemblable que la région où le pouvoir de pénétration est inférieur à 6 centimètres doit être attribuée aux rayons α du thorium X. Cette conclusion est vérifiée par les résultats ultérieurs.

En quatre jours, le radiothorium forme plus de la moitié de la teneur maxima en thorium X. Celui-ci donne naissance à l'émanation et celle-ci, à son tour, au thorium B et C. L'ionisation provenant de ce dernier doit pouvoir être observée dans la courbe et, comme on l'a vu, cela est bien le cas.

Evidemment, la même proportion de thorium B doit être présente, mais le pouvoir de pénétration des particules α de ce corps n'étant que de 5 centimètres, son effet s'ajoute à celui du thorium X sans qu'il se produise de coude marquée dans la courbe.

L'auteur a tracé en troisième lieu la courbe du même produit 21 jours après sa préparation. L'ionisation totale est plus de quatre fois plus forte qu'au début, et la portion relative au thorium C et au thorium X est beaucoup plus nettement marquée que dans la courbe précédente. Cette dernière courbe est semblable à la première de toutes les courbes dont il a été question au début de cette étude, comme on pouvait s'y attendre, car toutes deux représentent l'ionisation du radiothorium en équilibre.

Courbe d'ionisation du thorium X. — Le thorium X était obtenu de la façon ordinaire, en précipitant du thorium ou du radiothorium par de l'ammoniaque : le thorium X reste alors dans la solution, mais il subsiste un peu de radiothorium. En ajoutant un peu de fer et en précipitant à nouveau, la séparation du radiothorium est plus complète : d'ailleurs une partie du thorium X est précipitée aussi et affaiblit la préparation. Après enlèvement du sel d'ammonium, on dissout à nouveau le thorium X, on le place sur un couvercle plat en platine, et on l'évapore soigneusement. Ensuite on chauffe au chalumeau pendant quelque temps le couvercle, ce qui provoque la disparition complète du thorium A, et la disparition de la majeure partie du thorium B et du thorium C. Peu d'heures après l'échauffement, on traçait la courbe du thorium X.

Cette courbe montre que, pour une distance de $5^{cm},7$ environ, l'ionisation croît très rapidement, ce qui prouve que, en ce point, les rayons α d'un produit fortement actif entrent en jeu. Au-dessus de $5^{cm},7$ jusqu'à $8^{cm},6$, il se produit une faible ionisation due à des rayons α qui proviennent d'une petite quantité de thorium C contenu encore dans le thorium X. Les particules α dont le pouvoir de pénétration va jusqu'à $5^{cm},7$, appartiennent certainement au thorium X, mais il est difficile de fixer exactement, à un ou deux millimètres près, la limite de pénétration, à cause des perturbations dues à l'émanation, malgré un violent courant d'air. L'expérience répétée avec une feuille de mica placée sur la préparation active, feuille de mica qui équivalait à 2 centimètres d'air, a montré que la valeur de la limite à laquelle les rayons α du thorium X cessent d'ioniser l'air est de $5^{cm},7$ environ. Deux courbes furent relevées à nouveau par l'auteur, l'une 5 et l'autre 28 jours après la préparation du produit. On voit d'après ces courbes que l'activité du thorium X diminue graduellement. La très faible activité résiduelle montre que le thorium X était presque complètement dépourvu de radiothorium ou de radium.

Particules α de l'émanation du thorium. — Par suite de la grande intensité d'émanation du

thorium X ou du radiothorium, on ne peut pas employer avec succès la méthode électrique pour déterminer les limites d'ionisation des particules α provenant de l'émanation. Ces limites ont été déterminées d'après la distance jusqu'à laquelle les particules α produisaient encore la scintillation d'un écran à sulfure de zinc. Le dispositif était à peu près le même que celui employé par l'auteur pour la détermination des limites d'ionisation des rayons α du thorium C, dispositif dont il a été question dans la dernière publication. Le fil activé était remplacé par une feuille métallique repliée ayant quelques millimètres de hauteur et environ $2^{cm},5$ comme dimension superficielle. Un écran mince en mica, impénétrable pour l'émanation, était placé sur le bord supérieur ouvert de cette petite gouttière. Deux tubes en verre étroits amenaient dans le conduit ainsi formé un courant d'air ayant passé sur une préparation énergique de radiothorium et entraînant l'émanation. Au moment où l'air amenait l'émanation dans le conduit métallique, on pouvait voir la scintillation sur l'écran à sulfure de zinc placé à proximité de la feuille de mica : cette scintillation était due aux rayons α ayant traversé la feuille de mica et provenant de l'émanation. En modifiant la distance de l'écran, on déterminait la valeur de cette distance pour laquelle la scintillation cessait. Le chiffre ainsi obtenu est évidemment incertain entre d'étroites limites, mais, les résultats de plusieurs séries de mesures présentant une bonne concordance, la valeur observée ne doit pas beaucoup différer de la valeur réelle. L'auteur a trouvé le chiffre de 4 centimètres pour la distance maxima à laquelle on pouvait observer la scintillation : la feuille de mica correspondant à $1^{cm},2$ d'air, la limite est donc de $5^{cm},2$. En ce qui concerne l'exactitude de la méthode de scintillation en comparaison de la méthode électrique, l'auteur indique que, pour le radium C et pour le thorium C, il a trouvé les chiffres de 7,06 et 8,6 avec la méthode électrique, et les chiffres de $6^{cm},8$ et $8^{cm},3$ avec la méthode de scintillation. Donc avec la méthode électrique, on aurait trouvé comme limite, pour les particules α provenant de l'émanation, le chiffre de $5^{cm},2 + 0^{cm},3 = 5^{cm},5$. Dans le tableau suivant, l'auteur indique la limite d'action des particules α des cinq produits différents du thorium. Pour permettre la comparaison, il indique aussi les limites pour les particules α des produits du radium, déterminées par Bragg et Kleeman.

PRODUIT	LIMITE D'ACTION DES PARTICULES α dans l'air à la pression atmosphér.	PRODUIT	LIMITE D'ACTION DES PARTICULES α
Thorium. . .	Dépourvu de radiation ?	Radium. . .	$3^{cm},50$
		Émanation. .	4 23
Radiothorium.	$3^{cm},9$	Radium A. .	4 83
Thorium X. .	5 7	— B. .	Rayons β seulement.
Émanation. .	5 5	— C. .	$7^{cm},06$
Thorium A. .	Dépourvu de radiation.	— D. .	Pas de rayons.
		— E. .	Rayons β seulement.
— B. .	$5^{cm},0$	— F. .	$3^{cm},85$
— C. .	8 6		

Les résultats obtenus dans l'étude de l'auteur sur les rayons α du thorium sont en concordance parfaite avec la théorie de l'absorption des rayons α donnée par Bragg et Kleeman.

Les rayons α émis par chacun des produits se déplacent avec la même vitesse et cessent brusquement d'ioniser le gaz, après avoir parcouru un certain trajet dans l'air. Les particules α des différents produits se distinguent entre elles par leur vitesse initiale seule, vitesse qui détermine leur pouvoir de pénétration.

Si l'on admet que les particules α du radium et du thorium sont identiques, le résultat de l'étude de l'auteur montre que les rayons α du thorium sont émis en moyenne avec une vitesse un peu plus grande que ceux du radium. Dans les deux cas, la vitesse des particules α des produits correspondants radium C et thorium C est sensiblement plus grande que celle des particules α des autres produits.

B. L.

***Sur la radio-activité du thorium.* — H. M. Dadourian.** — *Physikalische Zeitschrift*, 1[er] juillet 1906.

O. Hahn a indiqué que l'on peut tirer de la thorianite des quantités importantes d'une substance radio-active beaucoup plus active que celle connue sous le nom de thorium. Le fait que cette substance donne lieu à la même émanation que le thorium l'a amené à supposer que l'activité de ce corps est due à l'existence de cette substance qu'il a désignée sous le nom de radiothorium. Il a, en outre, admis tout naturellement que le radiothorium est un produit de décomposition du thorium.

L'auteur s'est proposé d'étudier la relation quantitative existant entre l'activité de thorium de différents minéraux et sels et la teneur en

thorium de ceux-ci. La méthode employée repose sur la mesure de l'activité induite que l'on obtient quand on expose un corps chargé négativement aux émanations dégagées par la substance à étudier. Chacun des minéraux ou sels essayés était dissous, et la solution était placée dans un récipient en verre analogue à un cristallisoir, à fond plat de $9^{cm},5$ de diamètre et 4 centimètres de profondeur. Ce récipient était placé dans un cylindre en étain de 15 centimètres de diamètre et 18 centimètres de hauteur fermé par un fond et par un couvercle mobile et rendu étanche à l'air. Le corps sur lequel on devait obtenir le dépôt actif, était un disque de cuivre de 11 centimètres de diamètre, isolé du récipient en étain, et relié au pôle négatif d'une batterie à 400 volts dont l'autre pôle était connecté au récipient métallique. Après 19 heures d'exposition, on retirait la plaque de cuivre du récipient et on la plaçait dans un cylindre d'essais relié à un électromètre de Dolezalek; l'activité était ensuite observée de la façon habituelle. Un autre récipient d'essais, contenant un oxyde d'uranium normal, était placé en parallèle avec le premier et relié à l'électromètre, pour vérifier la sensibilité de cet appareil pendant le cours de l'essai et pouvoir tenir compte des modifications éventuelles. L'électromètre possédait une sensibilité d'environ 200 centimètres par volt pour une charge de 100 volts sur l'aiguille et une distance de l'échelle de 1 mètre.

L'émanation produite dans une couche horizontale donnée de la solution doit diffuser à travers le liquide recouvrant cette couche, avant d'atteindre la surface. Par suite de la rapide chute de l'émanation du thorium (la durée de demi-décomposition est de 54 secondes), la teneur de l'émanation produite dans cette couche et atteignant la surface du liquide dépend de la hauteur de la couche. Pour une égale concentration, l'émanation traversant pendant chaque seconde un centimètre carré de la surface dépend de la hauteur de la solution, si l'on suppose que cette hauteur n'est pas suffisante pour que l'émanation produite au fond ait le temps de tomber à une valeur négligeable avant d'atteindre la surface. Dans les expériences faites par l'auteur, la hauteur n'était pas suffisante pour que ce phénomène pût se produire, et l'on avait soin de donner la même hauteur à toutes les solutions étudiées, en employant toujours des volumes égaux de chacune d'elles (50^{cm^3}). Pour la même raison, on maintenait toujours à la même distance le disque négativement chargé.

Les solutions étudiées avaient différentes concentrations : pour pouvoir comparer leurs activités, on déterminait le rapport quantitatif entre la concentration de la solution et la quantité d'émanation produite. L'auteur a préparé deux solutions de nitrate de thorium, dont l'une avait une concentration double de l'autre. Les ionisations produites dans des conditions identiques furent dans le rapport de 10,9 à 5,4. Ce résultat montrait que l'émanation est proportionnelle à la concentration, comme on devait s'y attendre d'après des considérations théoriques. Les résultats obtenus sont résumés par le tableau 1.

TABLEAU I

SUBSTANCE I	NOMBRE DE GRAMMES dans la solution. II	TENEUR EN % en ThO^2. III	NOMBRE DE GRAMMES de ThO^2. IV	ACTIVITÉ OBSERVÉE V	ACTIVITÉ SPÉCIFIQUE VI
Thorite.	2	51,7	1,034	25,7 26,3	24,8 25,4
Thorianite.	1,29	76,5	0,987	21,2 25,2	21,5 25,5
Nitrate de thorium (1).	2,20	45,6	1,003	10,7	10,7
— (2).	2,15	46,6	1,002	12,5	12,5
— (3).	1,00	38,0	0,38	4,3	11,3
— (4).	0,77	48,9	0,376	8,3	22,1
— (5).	2,07	48,3	1,00	22,0	22,0

En ce qui concerne les différentes colonnes de ce tableau, on peut donner les indications suivantes :

Colonne I. — La thorite était dissoute dans l'acide chlorhydrique étendu. La solution était vaporisée puis filtrée, et étendue de 50 centimètres cubes d'eau. La thorianite était dissoute dans de l'acide nitrique concentré, la solution était étendue et filtrée, puis vaporisée et étendue de 50 centimètres cubes d'eau distillée. Les nitrates de thorium étaient de différentes provenances et étaient préparés depuis un temps plus ou moins long.

Colonne V. — Cette colonne indique, en centimètres par minute, la valeur moyenne de l'ionisation produite par le dépôt actif mesurée quatre

ou cinq heures après suppression de la différence de potentiel. Quelques unes des substances étudiées contenaient plus ou moins de radium ou d'actinium : une comparaison des activités observées peu après la suppression de la différence de potentiel n'avait donc pas permis de comparer les activités dues au thorium. Parmi les deux séries d'expériences faites sur la thorite et la thorianite, la seconde a été faite dans de meilleures conditions expérimentales.

Colonne VI. — Cette colonne indique l'activité par gramme d'oxyde de thorium pour les différentes substances. Elle est obtenue par division des chiffres de la colonne V par ceux de la colonne IV : pour abréger, l'auteur a nommé activité spécifique du thorium de la substance les chiffres ainsi obtenus. La concordance entre les activités spécifiques relatives à la thorite et à la thorianite est surprenante quand on songe à la différence de nature et d'origine de ces minéraux et aux difficultés expérimentales. La même concordance se retrouve entre les activités spécifiques des trois premiers nitrates de thorium du tableau. On constate que le thorium des sels est moitié moins actif que le thorium des minéraux. Ce fait ne peut être attribué à des erreurs d'expériences : il provient évidemment d'une cause déterminée. L'auteur a été conduit à supposer que le radiothorium est un produit de décomposition du thorium et donne naissance au thorium X. L'émanation du thorium étant un produit radioactif du thorium X, l'émanation d'une substance est proportionnelle à la quantité de thorium X existante. Dans une substance pour laquelle le thorium X et le radiothorium sont en équilibre radioactif, la quantité d'émanation du thorium est proportionnelle à la teneur en thorium X et à la teneur en radiothorium, mais non nécessairement au thorium existant dans la substance. Quand cependant les trois composantes, thorium, radiothorium et thorium X sont en équilibre radioactif, la proportionnalité existe pour tous trois. Toutes les substances étudiées se trouvaient en équilibre radioactif par rapport au thorium X. La quantité d'émanation de thorium dégagée par l'une quelconque d'entre elles doit donc être proportionnelle ou bien seulement à la quantité de radiothorium ou bien à la quantité de radiothorium et de thorium, suivant que ce dernier se trouve en équilibre radioactif ou non dans la substance.

Si l'on admet cette hypothèse, les résultats d'expériences résumées sur le tableau I s'en déduisent tout naturellement. La quantité d'émanation du thorium dégagée par les solutions de minéraux doit être proportionnelle à la teneur en thorium et en radiothorium, car, d'après toutes les vraisemblances, ceux-ci doivent se trouver en équilibre radioactif dans les minéraux. En d'autres mots, l'activité spécifique de minéraux doit être la même.

D'autre part, cette hypothèse conduit à la conclusion que la faible activité spécifique des sels achetés dans le commerce (nitrates 1, 2 et 3) est due à la perte d'une partie du radiothorium subie pendant la préparation chimique. Quand les sels de nitrate de thorium sont préparés en partant des minéraux, sans qu'il se produise de perte de radiothorium, l'activité spécifique est la même que celle des minéraux (nitrates 4 et 5 du tableau, préparés par le Dr Boltwood en partant de la monazite et de la thorianite).

Les conclusions de cette étude sont les suivantes :

La quantité de radiothorium existant dans les minéraux est proportionnelle à la quantité de thorium contenue. Le radiothorium est un produit de transformation du thorium.

Quand du thorium et ses produits successifs, radiothorium et thorium X sont à l'état d'équilibre radioactif dans une substance, la quantité d'émanation dégagée par la substance est proportionnelle à la quantité de l'un quelconque et aussi de tous les produits.

La différence des activités spécifiques de substances en équilibre radioactif par rapport au thorium X provient de la séparation d'une partie de la quantité de radiothorium correspondant à l'équilibre.

Le fait que le nitrate de thorium n° 3 préparé depuis plusieurs années présentait un manque sensible de radiothorium prouve que la durée de demi-décomposition de ce corps n'est pas inférieure à 2 ans.

B. L.

***Sur la chute de tension dans la couche positive dans l'hydrogène.* — P.-B. Pentscheff.** — *Physikalische Zeitschrift*, 1er juillet 1906.

Dans la théorie de l'ionisation par les chocs d'ions, on attribue une importance considérable à la chute de tension dans la couche isolée de la

colonne lumineuse positive ; d'après Stark, cette chute de tension ne peut pas être inférieure à une certaine valeur minima qui détermine le minimum d'énergie cinétique nécessaire aux électronions négatifs (rayons cathodiques) pour l'ionisation par choc.

L'auteur s'est proposé d'étudier, pour l'hydrogène, la relation entre la chute de tension dans la couche positive et l'intensité de courant ainsi que la pression du gaz. Il a d'abord essayé de déterminer cette chute de tension au moyen de sondes mobiles, mais cette méthode fut bientôt reconnue inutilisable par suite de la déformation des couches produites par les sondes. L'auteur a alors adopté la méthode de Stark : une cathode formée par un disque d'aluminium de 30 millimètres de diamètre était fixe, et l'anode, formée aussi d'un disque d'aluminium de 7 millimètres de diamètre, pouvait être déplacée au moyen d'un électro-aimant et être amenée contre la cathode ou éloignée à 40 centimètres de celle-ci. A quelque distance de la cathode, une sonde en platine plongeait dans la couche lumineuse négative. On plaçait d'abord l'anode assez loin de la cathode pour que plusieurs couches (n_1) fussent comprises entre les électrodes, et l'on mesurait la différence de potentiel V_1 entre l'anode et la sonde. Ensuite, l'intensité du courant étant maintenue constante, l'anode était approchée de la cathode jusqu'à ce que le nombre de couches tombât à la valeur n_2 : la différence de potentiel tombait à la valeur V_2. La différence de potentiel relative à une couche était $(V_1 - V_2)/(n_1 - n_2)$. La différence de potentiel était mesurée au moyen d'un électromètre à quadrants ; la source de courant était une batterie à haute tension : l'hydrogène était préparé par électrolyse.

L'auteur a trouvé en premier lieu que la présence de gaz étrangers a une grande importance pour la formation de stratifications. Quand il existe de faibles quantités de gaz étrangers, particulièrement de vapeur de mercure, il se forme des couches doubles : chaque couche se décompose en effet en deux parties de colorations différentes. Dans l'hydrogène absolument pur, les couches sont simples et présentent une coloration homogène.

La présence d'une trace de gaz étranger facilite la formation de stratifications ; plus l'hydrogène est pur et plus est petite la région d'intensité de courant et de pression dans laquelle la colonne lumineuse positive est stratifiée.

Dans l'hydrogène pur, la chute de tension dans la couche positive croît avec le courant pour une pression constante et diminue avec la pression par une intensité constante de courant : elle ne descend jamais au-dessous de 20 volts ; sa plus grande valeur a été de 55 volts.

Dans l'hydrogène impur, en présence de vapeur de mercure et d'autres gaz provenant du tube, la chute de tension dans la couche positive décroît généralement quand l'intensité du courant croît : elle est comprise entre 13 et 45 volts et ne descend jamais au-dessous de la limite inférieure. B. L.

GÉNÉRATION ET TRANSFORMATION

***Sur le coefficient de température du cuivre employé dans les enroulements des machines électriques.* — X. E. Kennelly.** — *Electrical World*, 30 juin 1906.

On admet généralement qu'un conducteur en bon cuivre commercial augmente uniformément de résistance quand la température augmente uniformément, ou, autrement dit, que la résistance et la température entre 0° et 100° sont liées entre elles par une fonction que représente une ligne droite. Le coefficient de température de la résistivité du cuivre est donné comme étant égal à 0,42 °/₀ par degré centigrade, d'après la formule

$$R_t/R_0 = 1 + 0{,}0042\, t \qquad (1)$$

en appelant R_0 la résistance du conducteur à 0° et R_t la résistance à t°.

Si l'on envisage un enroulement en cuivre, tel qu'un induit de dynamo, et si l'on suppose que, parti d'une résistance R_t correspondant à la température ambiante t°, il soit échauffé par le courant électrique à une résistance finale $R_{t+\theta}$ correspondant à une élévation de température de θ°, on a la relation

$$\frac{R_{t+\theta}}{R_0} = 1 + 0{,}0042\,(t + \theta). \qquad (2)$$

Les deux équations (1) et (2) permettent de déterminer l'élévation de température θ° quand on connaît $R_{t-\theta}$ et R_t. On tire, par exemple, de la première la valeur de R_0 que l'on porte dans la seconde.

L'auteur montre qu'il est beaucoup plus simple et plus rapide de se servir du tableau suivant, en employant la formule simple

$$\frac{R_{t+\theta}}{R_t} = 1 + \alpha\theta,$$

α étant un coefficient qui varie avec la températuture initiale t et qui est égal à 0,0042, comme dans l'équation (1) quand $t = 0$. Le coefficient α a approximativement les valeurs suivantes :

pour $t =$ 0°	$\alpha =$ 0,0042
6	0,0041
12	0,0040
18	0,0039
25	0,0038
32	0,0037
40	0,0036
48	0,0035.

TABLE DES COEFFICIENTS
DE TEMPÉRATURE DU CUIVRE COMMERCIAL
A DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES INITIALES

TEMPÉRATURE INITIALE °C. t	COEFFICIENT PAR DEGRÉ $\alpha \times 10^2$	TEMPÉRATURE INITIALE °C. t	COEFFICIENT PAR DEGRÉ $\alpha \times 10^2$
0	0,4200	26	0,3786
1	0,4182	27	0,3772
2	0,4165	28	0,3758
3	0,4148	29	0,3744
4	0,4131	30	0,3730
5	0,4114	31	0,3716
6	0,4097	32	0,3702
7	0,4080	33	0,3689
8	0,4063	34	0,3675
9	0,4047	35	0,3662
10	0,4031	36	0,3648
11	0,4015	37	0,3635
12	0,3999	38	0,3622
13	0,3983	39	0,3609
14	0,3967	40	0,3596
15	0,3951	41	0,3583
16	0,3936	42	0,3570
17	0,3920	43	0,3557
18	0,3905	44	0,3545
19	0,3890	45	0,3532
20	0,3875	46	0,3520
21	0,3860	47	0,3508
22	0,3845	48	0,3495
23	0,3830	49	0,3483
24	0,3815	50	0,3471
25	0,3801		

Le tableau précédent donne la valeur du coefficient α multiplié par 100, oú sa valeur en pour cent.

Comme exemple de l'emploi de ce tableau, l'auteur suppose qu'un enroulement d'induit de dynamo ait une résistance de 0,23 ohm à la température initiale de 25°, et que la résistance atteigne la valeur 0,271. L'accroissement de résistance est dans le rapport 0,271/0,23 = 1,1783 ou 17,83 %. Le coefficient pour une température initiale de 25° est 0,3801 %. Par conséquent, l'élévation de température est $\theta = 17,83/0,3801 = 46,9°$.

Comme autre exemple, l'auteur suppose un fil de cuivre ayant une résistance de 400 ohms à 11° et cherche sa résistance à 55°. Le coefficient pour 11° est 0,0415 % par degré. L'élévation de température est de 44° L'augmentation de résistance doit être de 44 × 0,4015 ou 17,67 %, ou dans le rapport 1,1767. La résistance finale doit donc être 400 × 1,1767 ou 470,68 ohms.

Comme on le voit, l'emploi de ce tableau simplifie beaucoup tous les calculs de température d'enroulements de machines électriques.

R. R.

Sur la production et la forme des harmoniques supérieurs dus aux dents des générateurs à courants alternatifs. — **K. Simons.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 5 juillet 1906.

C'est un fait universellement connu que le flux total dans un générateur à courants alternatifs ne reste pas invariable pendant un tour, quand l'arc polaire ne couvre pas un même nombre d'encoches et de dents, et qu'il oscille d'autant plus qu'il existe moins d'encoches. Par suite de cette variation du flux, il se produit une onde harmonique dont la fréquence correspond au nombre de dents, et est d'ordre pair. La règle souvent énoncée, d'après laquelle la courbe de tension peut être exprimée par les termes impairs d'une série de Fourier, semble ne pas tenir compte de ces ondes, dont l'effet peut cependant être important dans le cas de résonance. La forme et la phase de ces ondes harmoniques dépendent beaucoup de la longueur de l'arc polaire par rapport au pas des dents, abstraction faite du nombre de dents, dont dépend la fréquence.

L'auteur considère, pour plus de simplicité, une machine à entrefer constant : deux cas bien distincts sont possibles :

1° Le pôle recouvre un même nombre de dents et d'encoches.

2° Le nombre de dents recouvertes est supérieur, d'une unité, au nombre des encoches ou inversement.

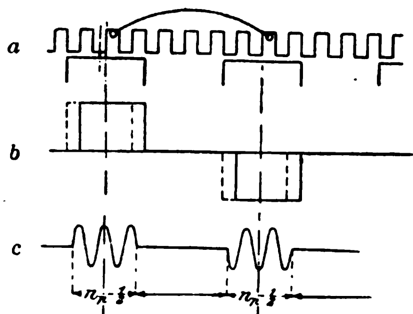


Fig. 1.

Dans le premier cas (fig. 1 *a*) si l'on suppose que les lignes de force passent perpendiculairement du pôle à l'induit, le nombre total de ces lignes ne varie pas, car il se trouve toujours le même nombre de dents sous l'arc polaire ; par contre, la position des lignes de force par rapport au milieu du pôle est déplacée d'une demi-largeur d'encoche vers la droite ou vers la gauche.

Il suffit, pour déterminer les harmoniques supérieurs, de se représenter un flux de grandeur invariable oscillant de part et d'autre avec une fréquence égale au nombre de dents et de placer la bobine dans différentes positions par rapport à lui (fig. 1 *b*). Tant que les côtés de la bobine se trouvent à l'intérieur du flux, les oscillations de celui-ci induisent des forces électromotrices même amplitude. S'il y a n_p dents devant le pôle et si la largeur d'une dent est égale à celle d'une encoche, il y a $(n_p - 1/2)$ périodes, et la courbe est symétrique par rapport au milieu du pôle. Si les côtés de la bobine embrassent le flux oscillant, il ne peut pas se produire de forces élcetromotrices, car le nombre des lignes de force embrassées reste constant. Les harmoniques auxquels on doit s'attendre ont donc la forme de la courbe 1 *c*. Si l'induit était lisse, la rotation engendrerait une f. é. m. de forme rectangulaire égale au contour extérieur de la figure 1 *b*, et l'on peut tirer la conclusion suivante :

Quand un pôle recouvre un même nombre de dents et d'encoches, il ne se produit d'harmoniques supérieurs qu'au maximum de la force électromotrice induite et un changement de phase au moment où l'induction est nulle.

Le second cas est représenté par la figure 2 dans laquelle, pour plus de simplicité, on a supposé la largeur des dents égale à la largeur des encoches. Dans ce cas, le flux total ne reste plus constant, mais varie d'une façon qui correspond aux n_p ou n_{p+1} dents situées sous le pôle.

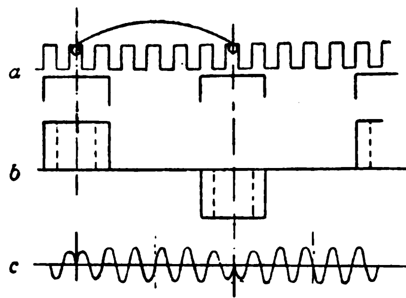


Fig. 2.

L'auteur considère à nouveau une bobine avec un pas d'enroulement égal au pas polaire : les harmoniques sont produits par un flux oscillant entre une largeur égale à $(n_p - 1/2)$ fois le pas des dents et une largeur de $(n_p + 1/2)$ fois le pas des dents. Ces oscillations produisent des forces électromotrices quand la bobine embrasse entièrement le flux. Quand les côtés des bobines sont situés à l'intérieur du flux, il se produit aussi des forces électromotrices, car le passage du flux le plus étroit au flux le plus large n'a pas lieu symétriquement au milieu du pôle. Au moment de la plus grande f. é. m. induite par le flux d'excitation, il se produit un changement de phase et l'on doit s'attendre à une forme analogue à celle de la courbe 2 *c*.

En pratique, on a généralement affaire à des cas intermédiaires. Des considérations analogues montrent que l'on doit s'attendre, par exemple, à des oscillations pendant toute la période et à un changement de phase inférieur à 90° au maximum de la f. é. m. induite quand l'arc polaire est égal à un multiple du pas des dents diminué d'une demi-largeur de dent. Au lieu d'un changement de phase, il peut se produire deux ondes de plus grande longueur.

Les harmoniques réels sont modifiés par le fait que les bobines sont toujours placées en série dans plusieurs encoches, que les pôles sont généralement arrondis, que les lignes de force

ne sont pas radiales, et finalement que les encoches sont généralement mi-fermées.

Un certain nombre d'oscillogrammes relevés par l'auteur sur différentes machines montrent qu'en ce qui concerne la forme générale de courbe des harmoniques supérieurs, les considérations qui précèdent sont exactes et que les conclusions sont pleinement vérifiées. L'auteur a enregistré simultanément la courbe de tension normale et la courbe des oscillations de tension renforcée par l'emploi d'un condensateur.

B. L.

Appareil pour la mise en parallèle automatique des générateurs triphasés. — **G. Benischke** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 5 juillet 1906.

L'appareil automatique qui doit connecter ensemble deux générateurs à courants alternatifs doit effectuer cette connexion au synchronisme seulement, c'est-à-dire quand les phases sont égales et quand la vitesse des deux machines est à peu près la même. Un phasemètre ne peut être employé dans ce but, car il indique la concordance de phases, mais non la fréquence. De même le comparateur de vitesses, établi depuis plusieurs années par l'auteur, ne se prête pas non plus à cette application, car il montre seulement si la machine à accoupler va trop vite ou trop lentement, et son aiguille est au zéro quand les fréquences sont égales, quelles que soient les phases.

L'appareil établi par l'auteur pour la mise en parallèle automatique des alternateurs se compose de trois parties : un interrupteur à commande électromagnétique S : un relais à action différée, et un appareil de synchronisation. Ce dernier remplit les deux conditions du synchronisme et peut, par suite, effectuer la connexion à l'instant du synchronisme. Il consiste en un électro-aimant portant trois enroulements D, G et H reliés, comme l'indique la figure 1, aux bornes des deux machines A et A'. Par suite de l'action simultanée de ces trois enroulements, l'armature B, sur laquelle agit un ressort antagoniste F, est attirée et libérée avec une périodicité égale à celle de l'éclat variable des lampes de phase. Le fonctionnement de l'interrupteur S ne devant se produire que quand le synchronisme existe depuis quelque temps, il a fallu intercaler un relais à action différée. A l'armature B de l'appareil de synchronisation est fixé un contact K qui ferme le circuit à courant continu KL. Le noyau de fer M du relais est soulevé lentement, grâce à la présence d'un frein à air, de sorte qu'il s'écoule un certain temps, de valeur réglable,

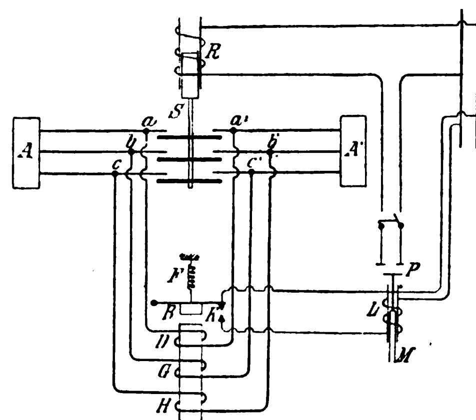


Fig. 1.

avant que le contact P soit fermé. Si le synchronisme ne persiste pas pendant un temps suffisant, le contact K se rouvre, avant que le contact P ait été fermé, et le noyau M du relais retombe à sa position primitive. Si le synchronisme dure au moins le temps pour lequel a été réglé le relais, le contact P ferme le circuit à courant continu PR; l'interrupteur électromagnétique S est actionné, et les machines sont accouplées. Pour régler l'intervalle de temps au bout duquel agit le relais à action différée, on modifie l'ouverture par laquelle s'échappe l'air contenu dans un petit cylindre : l'intervalle de temps peut ainsi être réglé à toutes les valeurs comprises entre 2 et 20 secondes. Quand le noyau de fer retombe, une soupape permet à l'air de rentrer immédiatement, de façon que le relais soit aussitôt prêt à fonctionner de nouveau.

Le mode d'action de l'appareil synchroniseur ne peut être mis en évidence que par une étude mathématique, car il s'agit de l'action résultante de trois champs magnétiques décalés entre eux.

Avant la mise en parallèle, les deux machines ont différentes vitesses, et différentes fréquences ν et ν'. Soient $\omega = 2\pi\nu$ et $\varphi = 2\pi\nu'$. Si l'on compte le temps t à partir d'un instant où les machines sont en synchronisme, et si E est la valeur maxima de la tension étoilée, on a, pour les trois tensions étoilées de la machine A :

$$\left.\begin{aligned} e_1 &= E \sin \omega t \\ e_2 &= E \sin(\omega t + 120^\circ) \\ e_3 &= E \sin(\omega t + 240^\circ). \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

Celles de la machine A′ sont les suivantes :

$$\left.\begin{aligned} e'_1 &= E \sin \nu t \\ e'_2 &= E \sin(\nu t + 120^\circ) \\ e'_3 &= E \sin(\nu t + 240^\circ). \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

La différence de potentiel e_I existant entre les bornes a et a' est donnée par la formule :

$$e_I = e_1 - e'_1 = E(\sin \omega t - \sin \nu t) \quad (3)$$

$$e_I = 2E \cos \frac{\omega + \nu}{2} t \sin \frac{\omega - \nu}{2} t. \quad (4)$$

C'est la différence de potentiel que l'on observe au moyen des lampes de phase ou au moyen d'un voltmètre.

Si l'on pose, pour abréger l'écriture

$$\cos \frac{\omega + \nu}{2} t = y, \quad (5)$$

on a : $$e_I = 2Ey \sin \frac{\omega - \nu}{2} t. \quad (6)$$

Si y est une constante, cette équation représente une onde sinusoïdale simple de pulsation $\frac{\omega - \nu}{2}$. En réalité, y est lui-même une fonction périodique variant entre 0 et 1. Le maximum $2 E_y$ varie donc entre 0 et 2, c'est-à-dire entre 0 et le double de la valeur maxima de la tension étoilée. La pulsation de y est $(\omega + \nu)/2$: à proximité du synchronisme, elle est à peu près égale à ω ou à ν. Au synchronisme exact $(\omega = \nu)$. cette pulsation est exactement égale à ω ou à ν, La pulsation de y est donc si grande que ni les lampes de phase ni le voltmètre ne peuvent l'indiquer, mais ces appareils se comportent comme si y était une constante égale à la valeur réciproque du facteur de forme, c'est-à-dire à $1/\sqrt{2}$ pour les courbes sinusoïdales. On peut donc, au point de vue des lampes, du voltmètre, et de l'électro-aimant, traiter e_I comme si cette différence de potentiel était simplement sinusoïdale. On voit que e_I est nulle quand $\omega - \nu$ est nul ou quand l'on a la valeur :

$$\frac{\omega - \nu}{2} t = \pi, 2\pi, 3\pi, 4\pi \cdots$$

ou $$t = \frac{2\pi}{\omega - \nu}, \frac{4\pi}{\omega - \nu}, \frac{6\pi}{\omega - \nu}, \frac{8\pi}{\omega - \nu} \cdots$$

Il en résulte que la durée d'une période de perturbation est égale à $2\pi/(\omega - \nu)$ ou que la durée d'une demi-période de perturbation depuis une valeur nulle de la tension jusqu'à la suivante est $\pi/(\omega - \nu)$, elle est donc d'autant plus longue que $\omega - \nu$ est plus petit, c'est-à-dire que les vitesses des deux machines sont plus différentes.

Si l'on considère la tension e_{II} entre les bornes b et c' de l'enroulement G, on a :

$$\begin{aligned} e_{II} = e_2 - e'_3 &= E[\sin(\omega t + 120^\circ) - \sin(\nu t + 240^\circ)] \\ &= 2E \cos\left(\frac{\omega + \nu}{2} t + 180^\circ\right) \sin\left(\frac{\omega - \nu}{2} t - 60^\circ\right)\Bigg] \\ &= -2E \cos \frac{\omega + \nu}{2} t \left[-\sin\left(\frac{\omega - \nu}{2} t - 60^\circ - 180^\circ\right)\right]. \end{aligned}$$

On a donc encore affaire au facteur remplacé plus haut par la lettre y. On a donc :

$$e_{II} = 2Ey \sin\left(\frac{\omega - \nu}{2} t + 120^\circ\right). \quad (7)$$

Pour la différence de potentiel e_{III} entre les bornes c et b' de l'enroulement H, on trouve de même

$$e_{III} = 2Ey \sin\left(\frac{\omega - \nu}{2} t + 240^\circ\right). \quad (8)$$

Les trois tensions e_I, e_{II}, e_{III} ont donc entre elles un décalage de 120°, comme dans un courant triphasé ordinaire. On a aussi

$$e_I + e_{II} + e_{III} = 0.$$

L'attraction de l'armature B dépend de la somme des flux magnétiques produits par les bobines D, G et H qui se superposent dans l'électro-aimant du noyau de l'équation fondamentale.

$$e = -dz/dt \quad (9)$$

ou $$z = -\int e dt, \quad (10)$$

On déduit des équations de tension en six champs magnétiques suivants :

$$\left.\begin{aligned} z_1 &= -\frac{E}{\omega} \cos \omega t = -Z \cos \omega t \\ z_2 &= -\frac{E}{\omega} \cos(\omega t + 120^\circ) = -Z \cos(\omega t + 120^\circ) \\ z_3 &= -\frac{E}{\omega} \cos(\omega t + 240^\circ) = -Z \cos(\omega t + 240^\circ) \end{aligned}\right\} \quad (11)$$

$$\left.\begin{aligned} z'_1 &= -\frac{E}{\nu} \cos \nu t = -Z \cos \nu t \\ z'_2 &= -\frac{E}{\nu} \cos(\nu t + 120^\circ) = -Z \cos(\nu t + 120^\circ) \\ z'_3 &= -\frac{E}{\nu} \cos(\nu t + 240^\circ) = -Z \cos(\nu t + 240^\circ). \end{aligned}\right\} \quad (12)$$

Quand les vitesses sont égales ($\omega = \nu$), on a $Z' = Z$. Pour une faible différence de vitesse, Z' et Z diffèrent peu l'une de l'autre : en outre quand on groupe en parallèle des alternateurs, l'égalité de tension n'est pas absolument nécessaire ; cet appareil dépend d'ailleurs peu de l'égalité des tensions. On peut donc poser pour simplifier

$$Z' = Z \tag{13}$$

Le flux magnétique z_I de la bobine D est alors

$$z_I = z_1 - z_1' = -Z(\cos \omega t - \cos \nu t)$$

$$z_I = 2Z \sin \frac{\omega + \nu}{2} t \sin \frac{\omega - \nu}{2} t. \tag{14}$$

Si l'on pose, pour abréger l'écriture :

$$\sin \frac{\omega + \nu}{2} t = x, \tag{15}$$

il vient : $z_I = 2Zx \sin \frac{\omega - \nu}{2} t.$ (16)

En développant de même le calcul pour le flux magnétique z_{II} de la bobine G, on trouve :

$$z_{II} = 2Zx \sin \left(\frac{\omega - \nu}{2} t + 120° \right) \tag{17}$$

et enfin, pour la bobine H, on obtient l'équation

$$z_{III} = 2Zx \sin \left(\frac{\omega - \nu}{2} t + 240° \right). \tag{18}$$

Les trois flux magnétiques des trois bobines se comportent donc comme les flux d'un courant triphasé ordinaire, la pulsation de x étant la même que celle de y, c'est-à-dire trop rapide pour intervenir dans l'attraction de l'armature B. La somme des trois flux est nulle si ceux-ci agissent dans le même sens. Mais, si le sens d'enroulement d'une bobine est inverse, le flux magnétique résultant est égal au double de celui d'une bobine. Soit z_r ce flux résultant, on a :

$$z_r = z_I - z_{II} + z_{III} = 2Zx \left[\sin \frac{\omega - \nu}{2} t - \sin \left(\frac{\omega - \nu}{2} t + 120° \right) + \sin \left(\frac{\omega - \nu}{2} t + 240° \right) \right].$$

ou finalement, après quelques simplifications,

$$z_r = 4Zx \sin \left(\frac{\omega - \nu}{2} t - 60° \right).$$

Si l'on compare cette expression avec celle de la différence de potentiel e_I (équation 16) à la lampe de synchronisation, on voit qu'elle a la même pulsation $(\omega - \nu)t/2$ mais est décalée de 60° en arrière. Avec ce décalage, le flux magnétique z_r ne serait pas utilisable, car il atteint 30° avant le passage de e_I par zéro sa valeur maxima $4Zx$. En réalité, le décalage n'est pas de 60°, car les actions des trois bobines ne se produisent pas semblablement, car ces bobines sont superposées ou juxtaposées. La bobine intérieure ou celle qui est le plus près de l'armature agit d'une façon plus intense que la bobine la plus éloignée. Suivant les connexions et les positions des bobines on peut trouver six modes de groupement différents, et, parmi ceux-ci, on en trouve facilement un pour lequel le décalage entre e_I et z_r soit d'environ 90°. Dans ce cas, l'armature B est attirée au moment où e_I passe par zéro, c'est-à-dire au bon moment pour la fermeture de l'interrupteur S.

En calculant les groupements possibles, au point de vue du flux résultant, l'auteur a trouvé que deux bobines enroulées en sens opposé produisent un champ résultant approprié. Par exemple, en combinant les flux z_{II} et z_{III}, on a

$$z_r = z_{II} - z_{III} = 2Zx \left[\sin \left(\frac{\omega - \nu}{2} t + 120° \right) - \sin \left(\frac{\omega - \nu}{2} t + 240° \right) \right]$$

ou $z_r = 2\sqrt{3} Zx \cos \frac{\omega - \nu}{2} t$

$$= 2\sqrt{3} Zx \sin \left(\frac{\omega - \nu}{2} + 90° \right).$$

L'appareil peut donc être construit avec deux bobines seulement sur l'appareil de synchronisation.

B. L.

***Sur les enroulements série-parallèle avec connexions équipotentielles** (suite). — **Arnold.** — Elektrotechnische Zeitschrift, 5 juillet 1906.*

Conditions particulières pour les connexions équipotentielles d'induits dentés. — Par suite du placement des bobines dans les encoches, il se produit une répartition non uniforme des côtés des bobines à la périphérie de l'induit : ce n'est qu'avec un côté de bobine ou deux côtés de bobine superposés par encoche que l'on obtient une répartition uniforme. Si l'on veut que a points d'un système soient au même potentiel, il faut que certaines conditions soient remplies. Si, dans certains cas, ces conditions ne peuvent pas être satisfaites, il faut calculer l'écart ou erreur qui existe par rapport aux points de même

potentiel. Pour les induits dentés, la condition principale de symétrie subsiste toujours, d'après laquelle le nombre de lames doit être divisible par le demi-nombre de branches d'induit.

k/a est un nombre entier. — On peut distinguer entre les différents enroulements série-parallèle suivants ;

1° p/a est un nombre entier. Pas du potentiel $y_p = k/a$; système à a connexions.

Pour que a points soient placés dans un champ de même intensité, il faut que :

a) a encoches soient dans un champ de même intensité.

b) les a conducteurs reliés à un système aient la même position dans l'encoche.

Ces deux conditions sont remplies quand Z/a est un nombre entier.

Pour ce cas, on obtient pour chaque p/a pas polaire double un nombre d'encoches entier, et pour chaque a^e partie de la périphérie de l'induit les encoches sont dans la même situation par rapport au pôle. En outre, comme l'on a :

$$y_p = \frac{k}{a} = \frac{(u_n/2)Z}{a},$$

et comme Z/a est un nombre entier, le pas du potentiel mesuré en distances des conducteurs (c'est-à-dire supposé égal à $2\ y_p$) est égal à u_n multiplié par un nombre entier, et les conducteurs distants de ce pas ont la même position dans l'encoche.

On peut examiner quelle dissymétrie se produit quand Z/a n'est pas un nombre entier. L'erreur commise par ce fait est double : en premier lieu les côtés des bobines reliés à un même système appartiennent à des encoches qui sont placées dans des champs d'intensités différentes et sont eux-mêmes disposés différemment dans les différentes encoches ; en second lieu, des conducteurs, placés dans des encoches différentes, se trouvent connectés en opposition.

2° p/a n'est pas un nombre entier. — Dans ces enroulements, les pas du potentiel sont différents et sont déterminés par les formules.

$$y_p = x \cdot y_k \pm 1$$

et

$$x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_a = p.$$

Les valeurs de x devant être aussi égales que possible et entières, il y aura toujours deux valeurs de x différant seulement d'une unité l'une de l'autre. On peut donc écrire :

$$2y_{p1} = 2x_1 y_k \pm 2$$
$$2y_{p2} = 2x_2 y_k \pm 2 = (2x_1 y_k \pm 2) + 2y_k.$$

Pour que les conducteurs connectés au même système aient la même position dans l'encoche, les pas $2y_{p1}$, $2y_{p2}$ etc., doivent être divisibles par u_n. Cela n'est possible que pour $u_n = 2$ pour tous les pas. Si l'on admet que $2y_{p1}$ soit divisible par u_n, il faut, pour que $2y_{p2}$ soit également divisible par u_n, que $2y_k$ soit divisible par u_n. Si $2\ y_k$ est divisible par u_n, $2y_{p1} = 2x_1 y_k \pm 2$ ne peut pas être divisible par u_n ($u_n > 2$). Il en résulte que les conducteurs reliés au même système ont dans l'encoche une position différente. En outre, les encoches dans lesquelles se trouvent les conducteurs connectés du même système se trouvent dans des champs d'intensités différentes, car Z/p ne peut jamais être égal à un nombre entier. Dans ces enroulements, on a toujours une dissymétrie.

Des dissymétries existent aussi pour Z/a égal à un nombre entier, et les erreurs commises peuvent être aussi importantes que quand Z/a n'est pas un nombre entier. D'après les expériences de l'auteur, il est malgré tout recommandable, quand c'est possible, de prendre pour Z/a la valeur d'un nombre entier. Des machines dans lesquelles Z/a n'est pas un nombre entier ont été, il est vrai, fréquemment établies et se sont bien comportées, tant que les erreurs n'ont pas dépassé une certaine limite.

Si p et a ont un plus grand commun diviseur g, p/g est un nombre entier. Si, en ontre, Z/g est égal à un nombre entier, on obtient, en joignant g points à un système d'égalisation, des connexions sans erreur. A ce groupe se rattachent aussi les enroulements avec a/p égal à un nombre entier. Quand Z/p est égal à un nombre entier, on peut, pour ces enroulements, relier sans erreur, p points au même système. En outre, il faut, en quelques points de la périphérie de l'induit, relier $q < a/p$ conducteurs voisins dans une encoche, quoi qu'ils n'aient pas exactement le même potentiel. Le calcul de l'erreur de pas ainsi commise sera développé plus loin.

Conditions pour que Z/a et k/a soient des nombres entiers dans des enroulements série-parallèle.

On peut examiner dans quel cas la condition Z/a entier est satisfaite. Si, dans la formule y_k

$=(k\pm a)p$ on remplace k par la valeur $Zu_n/2$ et Z/a par le nombre entier g, on obtient :

$$y_k=\frac{k\pm a}{p}=\frac{(u_n/2)\,Z+a}{p}=\frac{a}{p}\left(\frac{u_n}{2}g\pm 1\right).$$

Si l'on simplifie la fraction $a/p=t/r$ telle que t et r soient premiers entre eux, on peut écrire

$$y_k=\frac{t}{r}\left(\frac{u_n}{2}g\pm 1\right). \qquad (7)$$

Cette équation permet de déterminer pour quel rapport de a, p et u_n le pas y_k peut être un nombre entier. Si l'on ne considère pour u_n que les valeurs 2, 4, 6 et 8, on obtient, quand Z/a doit être un nombre entier, les conditions suivantes pour l'enroulement :

1° Quand r est divisible par 2 et non par 3, il faut que u_n soit égal à 3 ou à 6.

2° Quand r est divisible par 3 et pas par 2, il faut que u_n soit égal à 2, 4 ou 8.

3° Quand r est divisible par 2 et par 3, il faut que u_n soit égal à 2.

4° Quand r n'est divisible ni par 2 ni par 3, u_n doit être divisible par 2, 4, 6 ou 8.

D'après ces conditions, l'auteur a calculé les chiffres du tableau suivant qui indique les conditions pour lesquelles Z/a peut être égal à un nombre entier.

$p=1$	$u_n=2,\ 4,\ 6,\ 8$	pour toutes valeurs de a.
$p=2$	$u_n=2,$ » $6,$ »	$a=1,\ 3.$
	$u_n=2,\ 4,\ 6,\ 8$	$a=2,\ 4.$
$p=3$	$u_n=2,\ 4,$ » 8	$a=1,\ 2,\ 4,\ 5.$
	$u_n=2,\ 4,\ 6,\ 8$	$a=3,\ 6.$
$p=4$	$u_n=2,$ » $6,$ »	$a=1,\ 2,\ 3,\ 5,\ 6,\ 7.$
	$u_n=2,\ 4,\ 6,\ 8$	$a=4,\ 8.$
$p=5$	$u_n=2,\ 4,\ 6,\ 8$	pour toutes valeurs de a.
$p=6$	$u_n=2,$ » » »	$a=1,\ 5,\ 7,\ 11.$
	$u_n=2,\ 4,$ » 8	$a=2,\ 4,\ 8,\ 10.$
	$u_n=2,$ » $6,$ »	$a=3,\ 9.$
	$u_n=2,\ 4,\ 6,\ 8$	$a=6,\ 12.$
$p=7$	$u_n=2,\ 4,\ 6,\ 8$	pour toutes valeurs de a.
$p=8$	$u_n=2,$ » $6,$ »	$a=1,\ 2,\ 3,\ 4,\ 5,\ 6,\ 7,\ 9,\ 10,\ 11,\ 12,\ 13,\ 14,\ 15.$
	$u_n=2,\ 4,\ 6,\ 8$	$a=8,\ 16.$
$p=9$	$u_n=2,\ 4,$ » 8	$a=1,\ 2,\ 3,\ 4,\ 5,\ 6,\ 7,\ 8,\ 10,\ 11,\ 12,\ 13,\ 14,\ 15,\ 16,\ 17.$
	$u_n=2,\ 4,\ 6,\ 8$	$a=9,\ 18.$
$p=10$	$u_n=2,$ » $6,$ »	$a=1,\ 3,\ 5,\ 7,\ 9,\ 11,\ 13,\ 15,\ 17,\ 19.$
	$u_n=2,\ 4,\ 6,\ 8$	$a=2,\ 4,\ 6,\ 8,\ 10,\ 12,\ 14,\ 16,\ 18,\ 20.$
$p=11$	$u_n=2,\ 4,\ 6,\ 8$	pour toutes valeurs de a.
$p=12$	$u_n=2,$ » » »	$a=1,\ 2,\ 5,\ 7,\ 10,\ 11,\ 13,\ 14,\ 17,\ 19,\ 22,\ 23.$
	$u_n=2,$ » $6,$ »	$a=3,\ 6,\ 9,\ 15,\ 18,\ 21.$
	$u_n=2,\ 4,$ » 8	$a=4,\ 8,\ 16,\ 20.$
	$u_n=2,\ 4,\ 6,\ 8$	$a=12,\ 24.$
$p=13$	$u_n=2,\ 4,\ 6,\ 8$	pour toutes valeurs de a.
$p=14$	$u_n=2,$ » $6,$ »	$a=1,\ 3,\ 5,\ 7,\ 9,\ 11,\ 13,\ 15,\ 17,\ 19,\ 21,\ 23,\ 25,\ 27.$
	$u_n=2,\ 4,\ 6,\ 8$	$a=2,\ 4,\ 6,\ 8,\ 10,\ 12,\ 14,\ 16,\ 18,\ 20,\ 22\ 24,\ 26,\ 28.$
$p=15$	$u_n=2,\ 4,$ » 8	$a=1,\ 2,\ 4,\ 5,\ 7,\ 8,\ 10,\ 11,\ 13,\ 14,\ 16,\ 17,\ 19,\ 20,\ 22,\ 23,\ 25,\ 26,\ 28,\ 29.$
	$u_n=2,\ 4,\ 6,\ 8$	$a=3,\ 6,\ 9,\ 12,\ 15,\ 18,\ 21,\ 24,\ 27,\ 30.$
$p=16$	$u_n=2,$ » $6,$ »	$a=1,\ 2,\ 3,\ 4,\ 5,\ 6,\ 7,\ 8,\ 9,\ 10,\ 11,\ 12,\ 13,\ 14,\ 15,\ 17,\ 18,\ 19,\ 20,\ 21,\ 22,\ 23,\ 24,\ 25,\ 26,\ 27,\ 28,\ 29,\ 30,\ 31.$
	$u_n=2,\ 4,\ 6,\ 8$	$a=16,\ 32.$
$p=17$	$u_n=2,\ 4,\ 6,\ 8$	pour toutes valeurs de a.
$p=18$	$u_n=2,$ » » »	$a=1,\ 3,\ 5,\ 7,\ 11,\ 13,\ 15,\ 17,\ 19,\ 21,\ 23,\ 25,\ 29,\ 31,\ 33,\ 35.$
	$u_n=2,\ 4,$ » 8	$a=2,\ 4,\ 6,\ 8,\ 10,\ 12,\ 14,\ 16,\ 20,\ 22,\ 24,\ 26,\ 28,\ 30,\ 32,\ 34.$
	$u_n=2,$ » $6,$ »	$a=9,\ 27.$
	$u_n=2,\ 4,\ 6,\ 8$	$a=18,\ 36.$
$p=19$	$u_n=2,\ 4,\ 6,\ 8$	pour toutes valeurs de a.
$p=20$	$u_n=2,$ » $6,$ »	$a=1,\ 2,\ 3,\ 5,\ 6,\ 7,\ 9,\ 10,\ 11,\ 13,\ 14,\ 15,\ 17,\ 18,\ 19,\ 21,\ 23,\ 22,\ 25,\ 26,\ 27,\ 29,\ 30,\ 31,\ 33,\ 34,\ 35,\ 37,\ 38,\ 39.$
	$u_n=2,\ 4,\ 6,\ 8$	$a=4,\ 8,\ 12,\ 16,\ 20,\ 28,\ 32,\ 36,\ 40.$

L'équation

$$y_k=\frac{k\pm a}{p}=\frac{a}{p}\left(\frac{k}{a}\pm 1\right)$$

montre que la condition k/a entier peut toujours être remplie pour un enroulement uniformément réparti : pour les induits dentés, quand chaque encoche doit contenir un même nombre de conducteurs, on a encore la condition que k divisé par $u_n/2$ soit un nombre entier.

Un examen plus complet montre que la condi-

tion k/a entier peut être remplie par un même nombre de conducteurs par encoche quand :

1° a est divisible par $u_n/2$.

2° les conditions indiquées dans le tableau pour Z/a entier sont remplies.

Réalisation de la divisibilité de K *par a et de* Z *par a par l'adjonction de conducteurs inactifs et augmentation du nombre d'encoches.*

Dans ce qui précède, on a vu qu'il n'est pas toujours possible de remplir simultanément la condition k/a entier et $2k/u_n$ entier. Dans ces cas, on doit toujours satisfaire la condition principale de symétrie k/a entier, en plaçant dans quelques encoches des conducteurs inactifs. En augmentant le nombre d'encoches et en ajoutant des conducteurs inactifs, on peut toujours satisfaire à la condition Z/a entier. Si l'on ajoute $2a$ conducteurs inactifs, Z/a est toujours égal à un nombre entier.

L'étude de différents enroulements a montré que les erreurs commises pour les enroulements dans lesquels p/a n'est pas un nombre entier ne sont pas diminuées par l'augmentation du nombre d'encoches à une valeur divisible par a. Par contre, les enroulements avec p/a entier, pour lesquels, sans augmentation du nombre d'encoches, la condition Z/a entier ne peut être remplie, sont rendus complètement symétriques par cet artifice.

Ce n'est donc que dans les enroulements série-parallèle avec p/a entier que l'on doit remplir, par augmentation du nombre d'encoches, la condition Z/a entier (et aussi k/a entier), dans les enroulements série-parallèle où p/a n'est pas un nombre entier, on rend seulement k/a égal à un nombre entier.

(A suivre.) B. L.

ÉCLAIRAGE

Sur l'éclairage des rues. — **L. Bloch.** — *Elektrotechnik und Maschinenbau*, 17 juin 1906.

L'auteur indique les résultats de comparaisons faites à Berlin sur des rues éclairées au moyen de différents illuminants. L'éclairage au gaz, avec lequel il compare l'arc électrique, est obtenu au moyen de gaz comprimé à une pression élevée et fourni par une installation spéciale de compression d'après un système employé récemment dans plusieurs quartiers de Berlin. Le gaz brûle dans un bec approprié et porte à l'incandescence un manchon de grandes dimensions. Sur les candélabres employés à Berlin sont placés deux becs disposés côte à côte à une hauteur de 5m,7 au-dessus du sol. En général, la consommation de gaz est de 600 litres par heure par bec. L'emploi de ces brûleurs intensifs a permis d'augmenter considérablement l'éclairement des rues éclairées précédemment au moyen de becs Auer ordinaires. Dans d'autres rues, l'éclairage est assuré par des lampes à arc de 15 ampères à globe opale placées à 10 mètres de hauteur environ : la distance moyenne entre deux lampes est de 30 mètres.

D'assez nombreuses comparaisons ont été faites dans le courant de l'année précédente entre ces deux modes d'éclairage. Les lampes à gaz comprimé à deux becs étaient placées à 42 mètres de distance : les mesures portaient sur l'éclairement dans un plan horizontal situé à 1m,50 de hauteur. La moitié de la surface de rue comprise entre deux lampes était divisée en 24 rectangles, et l'éclairement horizontal était déterminé pour le centre de chacun de ces rectangles : la répartition étant symétrique dans la seconde moitié, on ne renouvelait pas l'opération sur celle-ci. On prenait ensuite la moyenne des éclairements trouvés pour tous les rectangles, et l'on en déduisait l'éclairement horizontal moyen pour toute la surface de la rue. Cette valeur peut être prise comme mesure de l'éclairement d'une rue. Elle a été trouvée égale à 6,8 lux et à 5,2 lux pour deux des rues éclairées par des lampes à arc.

Le chiffre de l'éclairement moyen ne suffit pas seul pour caractériser la valeur de l'éclairement d'une rue : la question d'uniformité joue aussi un rôle et peut être appréciée d'après les valeurs maxima et minima, comme l'a déjà indiqué l'auteur dans une étude publiée antérieurement[1]. Plus le rapport des valeurs maxima ou minima à la valeur moyenne de l'éclairement est voisin de l'unité, et plus l'éclairement peut être considéré comme satisfaisant. La comparaison faite à ce point de vue entre l'éclairage par lampes à arc et l'éclairage par lampes à gaz comprimé a montré que le premier est beaucoup plus uniforme que le second : ce fait est évidemment dû à la

[1] Voir *Éclairage Électrique*, tome XLVII, 16 juin 1906, p. 430.

plus grande hauteur du point lumineux dans le cas des lampes à arc.

Pour permettre une comparaison directe entre l'éclairage avec du gaz comprimé et l'éclairage électrique, on fit, d'après les résultats obtenus pour une rue éclairée au gaz, le calcul de l'éclairement qu'aurait la rue éclairée électriquement, en admettant la même distance entre les lampes, mais un nombre double de lampes (une rangée sur chaque trottoir au lieu d'une rangée au milieu de la rue). Le résultat trouvé est un éclairement moyen de 7 lux. Les valeurs du rapport entre les éclairements maximum et minimum et l'éclairement moyen, qui déterminent l'uniformité de l'éclairement, sont de beaucoup moins satisfaisantes dans ce cas que dans le cas de l'éclairage électrique, malgré le nombre double de lampes employées.

Pour pouvoir faire une comparaison entre les résultats obtenus avec l'éclairage électrique et l'éclairage au gaz, il faut exprimer l'éclairement horizontal moyen obtenu en fonction des dépenses. A côté des dépenses de courant ou de gaz, il faut, bien entendu, envisager aussi les dépenses d'entretien et de renouvellement : or, pour l'éclairage au gaz comprimé, ces dépenses ne sont pas exactement connues à l'heure actuelle. Approximativement, on peut admettre que les dépenses d'entretien et de renouvellement pour l'éclairage au gaz sont égales à celles relatives à l'éclairage électrique : il ne reste plus alors qu'à comparer les consommations de gaz et de courant. Les lampes à arc absorbent 55 volts $\times$ 15 ampères $=$ 825 watts : une lampe éclaire une superficie de 22 $\times$ 30 mètres soit 660 mètres carrés. L'éclairement moyen horizontal étant de 6,8 lux, la dépense est de 18,4 watts par 100 mètres carrés et par lux. Pour la lumière de gaz comprimé, une lampe à deux becs consomme 1 200 litres. Dans la rue Alexandre, une lampe éclaire 21 $\times$ 21 $=$ 441 mètres carrés avec un éclairement de 5,2 lux. La consommation de gaz est donc de 52 litres par heure par 100 mètres carrés et par lux. Les chiffres ainsi obtenus ont été vérifiés pour plusieurs autres rues et ont été trouvés égaux. En chiffres ronds on a donc 18 watts ou 50 litres comme consommation par lux et par 100 mètres carrés. Il faut, en outre, tenir compte de ce que l'éclairage électrique est plus uniforme, comme on l'a vu ci-dessus. On voit que, pour un même prix de gaz et du courant électrique (par exemple 15 centimètres par mètre cube et par kilowatt-heure), les dépenses en courant électrique ne sont que les 36 % des dépenses en gaz. Les dépenses sont égales quand le courant coûte 2,75 fois plus cher que le gaz (par exemple 41,5 centimes pour le kilowatt-heure et 15 centimes par mètre cube de gaz). Pour l'éclairage public, le rapport du prix du courant électrique au prix du gaz est toujours inférieur au chiffre de 2,75 : l'éclairage électrique est donc plus économique. Les conclusions qui précèdent ne sont valables qu'autant que les frais d'entretien et de renouvellement sont les mêmes.

Quoique, dans les éclairements étudiés, on ait affaire à des éclairements assez intenses, on est encore loin de la limite atteinte. Pour le gaz comprimé, on a construit des brûleurs de 1 200 litres et l'éclairement est à peu près doublé. Dans la Kœnigsstrasse, à Berlin, éclairée avec ces lampes, on atteint des éclairements maxima de 45 lux et des éclairements moyens de 11 lux, avec une consommation de 48 litres de gaz par lux et par 100 mètres carrés de surface. Avec l'éclairage électrique (lampes à arc à flamme intensives) on arrive à des éclairements encore plus élevés. Sur la place de Postdam, deux candélabres placés à 45 mètres de distance et portant chacun quatre lampes à arc de 20 ampères placées à 18 mètres de hauteur, on obtient un éclairement maximum de 82 lux et un éclairement moyen de 18,8 lux, correspondant à une consommation de 6,5 watts par lux et par 100 mètres carrés de surface. Dans ces cas, la comparaison est encore plus à l'avantage de l'éclairage électrique. D'ailleurs, le besoin d'éclairement aussi considérable se fait rarement sentir.

E. B.

Sur la durée économique des lampes à incandescence. — **L. W. Wild.** — *Elektrotechnik und Maschinenbau*, 17 juin 1906.

La durée la plus économique de fonctionnement des lampes à incandescence dépend, comme l'on sait, du rapport du prix du courant au prix d'achat de la lampe. L'auteur a fait des essais très complets sur 48 lampes de 16 bougies à 200 volts de 12 fabricants différents. Il a trouvé les résultats suivants pour la consommation moyenne en watts par bougie en fonction de la durée d'utilisation.

DURÉE D'UTILISATION	BOUGIES MOYENNES	CONSOMMATION MOYENNE PAR BOUGIE
100	16,3	3,695
200	15,9	3,79
300	15,5	3,875
400	15,15	3,96
500	14,8	4,04
600	14,5	4,12
700	14,2	4,195
800	13,9	4,27
900	13,7	4,345
1 000	13,5	4,41

Si l'on admet que le prix d'une lampe est de 1 franc et que le prix de courant électrique soit de 0 fr. 10 par kilowatt-heure, on trouve les chiffres suivants par bougie-heure en centimes.

DURÉE de FONCTIONNEMENT en heures.	DÉPENSES de COURANT	DÉPENSES de RENOUVELLEMENT	DÉPENSES TOTALES
100	0,03695	0,0613	0,09825
200	0,0379	0,0315	0,0694
300	0,03875	0,0215	0,06025
400	0,0396	0,0165	0,0561
500	0,0404	0,0135	0,0539
600	0,0412	0,0115	0,0527
700	0,04195	0,0101	0,05205
800	0,0427	0,0090	0,0517
900	0,04345	0,0081	0,05155
1 000	0,0441	0,0074	0,0515

Dans ces conditions, 1 000 heures seront la durée la plus économique : si le prix du courant est plus élevé, la lampe doit être plus poussée.

Les durées les plus économiques sont les suivantes pour différents prix du courant :

PRIX DE COURANT EN CENTIMES	DURÉE LA PLUS ÉCONOMIQUE EN HEURES
10	1 000
20	650
30	500
40	450
50	400
60	300

E. B.

Sur la température de la lampe Nernst. — **L.-W. Hartman.** — *Physical Review*, juin 1906.

L'auteur estime que les déterminations de la température du bâtonnet Nernst ont conduit à des valeurs trop élevées, car ces déterminations reposent sur la loi de radiation d'un corps noir, catégorie de radiateurs dont le bâtonnet Nernst ne fait pas partie. Les valeurs obtenues par des mesures pyrométriques sont concordantes et indiquent une température de 2 360° absolus. L'auteur, abandonnant la méthode pyrométrique pour la raison indiquée ci-dessus, s'est servi d'un couple thermo-électrique pour déterminer la température de la lampe Nernst. Plusieurs thermo-éléments furent établis avec du platine et du platine rhodié employé sous forme de fils de différents diamètres. Le bâtonnet Nernst, connecté en série avec une résistance ballast convenable et un rhéostat de réglage, était amené au point d'incandescence normal et le point de jonction du thermo-couple était approché peu à peu. L'auteur a constaté avec surprise que cette jonction pouvait être amenée en contact avec le bâtonnet incandescent sans qu'il se produisît de fusion ou de détérioration. Cela indique déjà que la température du corps incandescent est beaucoup plus faible qu'on ne l'avait précédemment supposé. Au moyen de thermo-éléments de différentes grandeurs, on a pu tracer une courbe reliant la force électromotrice et la section des fils du couple : cette courbe fut prolongée jusqu'à son intersection avec l'axe du diamètre, et l'on admit que la valeur ainsi obtenue correspondait à celle d'un couple dépourvu de dimensions. Des lectures furent faites avec un grand nombre de bâtonnets différents. Les valeurs obtenues sont comprises entre 1 780 et 1 800° absolus. La valeur moyenne est de 1791° absolus. Après ces expériences, on vérifiait, dans une flamme Bunsen, l'étalonnage du thermo-couple et on ne constatait aucune différence.

L'auteur montre, dans une comparaison de ces bâtonnets avec les corps noirs de mêmes dimensions, que le nombre de watts nécessaire par unité de longueur du bâtonnet pour élever celui-ci à une température donnée est beaucoup plus grand pour un corps noir que pour un bâtonnet Nernst, ce qui prouve que ce dernier ne suit pas la loi de radiation d'un corps noir. Si l'on suppose que la température des bâtonnets est celle qu'avait un corps noir, les pertes en watts par centimètre de

longueur doivent être faibles, et comprises entre 5 et 7 °/₀. D'autre part, si l'on considère comme vraies les températures obtenues au moyen du thermo-élément, il y a 70,5 °/₀ de pertes. Ces considérations montrent que la supériorité économique du bâtonnet Nernst par rapport à un corps noir n'est pas aussi grande qu'on l'avait pensé. R. R.

MESURES

Mesure des courants alternatifs de faible intensité. — **Wertheim-Salomonson.** — *Physikalische Zeitschrift*, 10 juillet 1906.

Klemencic a indiqué une méthode de mesure pour les courants alternatifs de faible intensité. Deux fils minces en fer et constantan sont tordus une fois ensemble. Quand le courant alternatif passe du fil de constantan au fil de fer, il échauffe le point de contact, et une f. é. m. thermo-électrique prend naissance : un galvanomètre sensible permet de mesurer celle-ci.

Cette méthode présente des inconvénients dans la pratique. Quand le point de contact est soudé, le dispositif est moins sensible : quand il n'est pas soudé, il est difficile d'obtenir un bon contact, et il se produit une sorte d'action de cohéreur en ce point, la résistance apparente étant plus faible pour des courants à haute tension que pour des courants à basse tension. Quand on mesure des courants alternatifs dissymétriques, tels que ceux produits par le secondaire d'une bobine d'induction, les courants d'ouverture passent par le contact, tandis que les courants de fermeture passent parfois par le galvanomètre : les déviations de ce dernier sont, par suite, très irrégulières.

L'auteur a cherché à rendre la méthode thermo-électrique plus sensible et plus pratique. Il a employé, pour cela, le dispositif suivant :

Au lieu d'un thermo-élément unique, on emploie un grand nombre de ces appareils placés en deux séries reliées en parallèle. L'origine et l'extrémité des deux séries sont reliées au galvanomètre. Pour que le courant alternatif à mesurer n'exerce aucune influence directe sur le galvanomètre, on branche chacun des conducteurs au milieu de chaque série de thermo-éléments. Si les résistances p, q, r, s comprises entre les quatre bornes servant de jonction avec la source à courant alternatif et le galvanomètre sont telles que le rapport de deux d'entre elles p/q soit égal au rapport des deux autres r/s, le système est semblable à un pont de Wheatstone : le courant ne passe donc pas par le galvanomètre. Pour égaliser les quatre résistances, on place, dans l'une des branches, un rhéostat réglable d'une façon continue, dont on modifie la résistance jusqu'à ce que la déviation du galvanomètre ne varie pas quand on inverse un courant introduit par les bornes servant au courant alternatif à mesurer. On pourrait également effectuer le réglage avec du courant alternatif et un téléphone.

Pour que les points de contact ne soient pas tous échauffés par le passage du courant alternatif à mesurer, mais seulement le premier, troisième, cinquième, etc., les deuxième, quatrième, sixième contacts restant froids, ces derniers contacts sont établis entre des plaques épaisses en même métal.

Le dispositif est établi de la façon suivante. Sur une plaque en ébonite sont disposées quatre rangées de plaques métalliques. Les deux rangées extérieures sont formées alternativement d'une plaque de fer et d'une plaque de constantan. Les rangées intérieures sont formées de plaques de laiton. Entre chaque groupe formé par une plaque de fer et une plaque de constantan est placé un thermo-élément en fil de 0,021 millimètre : les plaques de laiton servent à fixer les deux extrémités opposées de ces thermo-éléments. Le fil de fer est soudé à la plaque de fer : de même le fil de constantan est soudé à la plaque de constantan. Les thermo-éléments individuels sont reliés en série par les plaques de laiton.

Dans l'appareil employé par l'auteur, il y a dix thermo-éléments dans chaque série, qui présente une résistance de 60,1 ohms. L'appareil est recouvert d'une plaque métallique soigneusement polie. Les déviations du galvanomètre sont proportionnelles au carré de l'intensité du courant. La sensibilité de l'appareil est telle qu'un courant de un milliampère produit une f. é. m. thermoélectrique de 7,5 microvolts. Avec un galvanomètre de Hartmann et Braun, un courant de 0,172 milliampère donne une déviation de 1 division sur une échelle placée à une distance de 1000 divisions. Avec un galvanomètre encore plus sensible, on peut déceler un courant de 2.10^{-5} ampères.

E. B.

CHARTRES — IMPRIMERIE DURAND, RUE FULBERT.

Le Gérant : J.-B. NOUET.

Tome XLVIII. Samedi 18 Août 1906. 13e Année. — N° 33.

L'Éclairage Électrique

REVUE HEBDOMADAIRE DES TRANSFORMATIONS

Electriques — Mécaniques — Thermiques

DE

L'ÉNERGIE

SUR UN NOUVEAU MODE DE COMPOUNDAGE DES ALTERNATEURS

On a indiqué à plusieurs reprises la possibilité d'obtenir par l'emploi de commutatrices la régulation automatique de la tension des alternateurs. L'examen théorique d'un compoundage de ce genre avec l'emploi de deux commutatrices conduit à des conclusions particulièrement intéressantes tant au point de vue du compoundage proprement dit, que du fonctionnement des commutatrices en général.

Le schéma de montage du compoundage à deux commutatrices est donné par la figure 1 pour un alternateur triphasé. Deux commutatrices C*d* et C*s*, accouplées rigidement, sont alimentées, l'une par un transformateur dérivation T*d*, branché sur les bornes de l'alternateur G, l'autre par un transformateur série T*s*, dont l'enroulement primaire est parcouru par le courant de l'alternateur. Du côté continu, les deux commutatrices sont montées en série et alimentent les inducteurs P de l'alternateur.

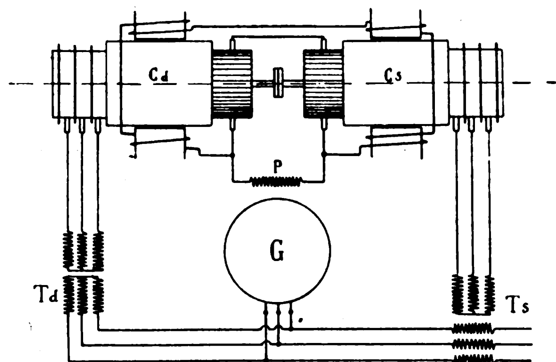


Fig. 1.

Il y a différentes manières d'exciter les commutatrices : elles peuvent être toutes deux auto-excitatrices ; on pourra les exciter par une source indépendante ; ou bien encore leurs systèmes inducteurs peuvent être montés soit en parallèle, soit en série, et alimentés en parallèle avec les inducteurs de l'alternateur. La dernière variante est celle de la figure 1.

Dans la suite nous admettons toujours des commutatrices à entrefer uniforme, construites

comme les moteurs asynchrones. Grâce à sa réluctance constante, l'étude d'une machine de ce type est plus simple que celle d'une commutatrice à pôles saillants. Les conclusions ne sont d'ailleurs pas affectées par cette hypothèse. Nous admettons de plus les balais placés dans la ligne neutre et négligeons en outre les frottements, les pertes dans le fer et la résistance de l'induit.

Rappelons en quelques mots les propriétés d'une commutatrice seule.

La somme de tous les ampère-tours agissant dans cette machine, tant dans l'induit que sur les pôles, doit produire le flux résultant Φ perpendiculaire à la ligne des balais et qui fait équilibre à la tension alternative Ea appliquée entre les bagues. Ce flux a la direction de la somme X de tous les ampère-tours et lui est proportionnel (fig. 2). Or cette somme est la résultante de OC $=$ Xa produit par le courant alternatif Ia, de CD $=$ Xe provenant de l'excitation continue sur l'inducteur et de DE $=$ OB $=$ Xc engendré par le courant continu Ic. Cette dernière composante est dirigée dans la ligne bb des balais, tandis que Xe lui est perpendiculaire. La valeur et la direction de Xa dépendent de la valeur de Xe ; Xa est égal à OD si Xe $=$ o et égal à OA si tout le flux Φ est produit par l'inducteur. L'angle de décalage entre la force électromotrice Ea aux bagues et le courant alternatif est mesuré par l'angle φ entre Xa et la direction OEa qui avance de 90° sur Φ. Cet angle de décalage est o pour Xe $=$ X. Le courant alternatif avance sur Ea pour des valeurs de Xe $>$ X, il retarde sur Ea si Xe $<$ X.

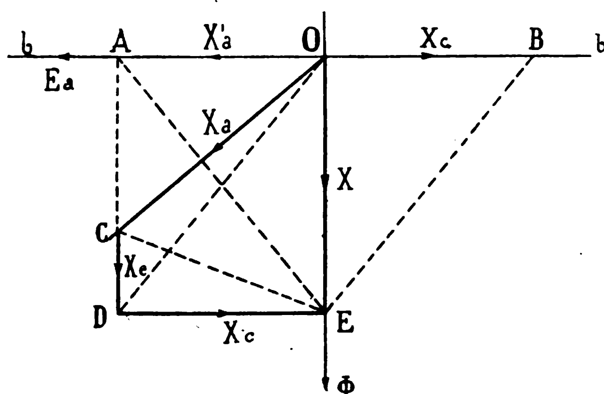


Fig. 2.

OB $=$ Xc et la composante OA $=$ X'a de Xa dans la ligne des balais sont égaux et de sens inverse. Il ne subsiste donc dans la commutatrice ordinaire aucun flux transversal et la tension continue est constante quelle que soit la charge et quelle que soit l'excitation sur l'inducteur.

L'égalité de Xc et de X'a peut aussi se vérifier par la considération suivante : Le couple mécanique d'une commutatrice est nul. Il faut donc que les couples produits par les courants continu et alternatif se neutralisent. Or le premier est, à un facteur près, égal au produit OE $\times$ OB, c'est-à-dire égal au produit du flux par les ampère-conducteurs qui lui sont perpendiculaires, et peut être représenté par la surface du triangle OBE ; le dernier par contre est donné par la surface du triangle OAE. Il faut donc que

$$OA = OB.$$

Mais il n'en est plus de même, si la commutatrice exerce un couple soit positif, soit négatif ; positif si elle travaille en même temps comme moteur synchrone, négatif si elle est entraînée par un moteur synchrone. Dans le premier cas la puissance alternative est plus grande que la puissance continue, dans le dernier cas où la commutatrice joue en même temps le rôle de génératrice à courant continu, la puissance continue l'emporte sur la puissance alternative.

Nous pouvons nous rendre compte par les réflexions suivantes de ce qui se passe dans l'un et l'autre de ces cas.

Dans toute commutatrice tournant par ses propres moyens, la force électromotrice de la

phase *ab* (fig. 3) passe par zéro aussitôt que le milieu de la partie d'enroulement *ab* coïncide avec la ligne des balais. En l'entraînant par un moteur synchrone, on peut donner à la commutatrice un calage tel que ce changement de signe de la force électromotrice ait lieu sur une ligne décalée d'un angle α en avant ou en arrière par rapport à la ligne des balais, ce qui entraîne un décalage correspondant par rapport à la perpendiculaire sur la ligne des balais du flux résultant Φ et des ampère-tours X qui l'engendrent (fig. 4 et 5).

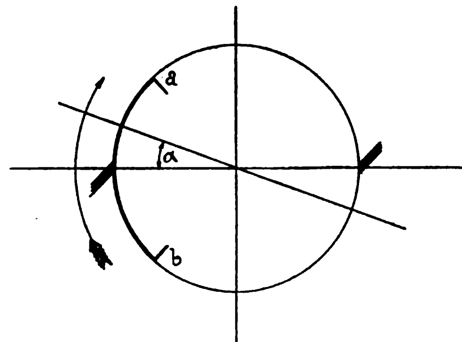


Fig. 3.

Etant donnée la force électromotrice E*a* entre les bagues et par suite Φ et X, connaissant en outre l'angle de calage α, la valeur du courant continu et l'excitation sur l'inducteur, il est facile, par analogie de la figure 2, de tracer les diagrammes, figures 4 et 5, correspondant le premier à un décalage en arrière, le dernier à un calage en avant de la commutatrice, calages que nous venons de définir. La tension continue E*c* est proportionnelle à la composante X*p* de X, perpendiculaire à la ligne des balais et nous voyons que cette tension varie avec l'angle α, toutes les autres données restant constantes.

Nous déduisons des figures 4 et 5

$$\Phi p = \Phi \cos \alpha$$

d'où

$$Ec' = Ec \cos \alpha,$$

E*c'* désignant la tension continue d'une commutatrice ayant un angle de calage α, et E*c* la tension continue d'une commutatrice normale.

Les réactions transversales $X'a = OA$ et $Xc = OB$ ne sont plus égales ; il subsiste une réaction d'induit X*r*. Pour un calage α en arrière le courant continu l'emporte sur le courant alternatif; le contraire a lieu pour un calage en avant.

Les couples produits par les courants alternatif et continu eux aussi ne sont plus restés égaux. Le couple du côté alternatif est donné, OG étant la composante de X*a* perpendiculaire à X et à Φ, par la surface des triangles

$$OEG = OEC.$$

Du côté continu, le couple peut être représenté par les triangles

$$OFB = OED.$$

Le triangle OEH est commun à OEC et OED et la différence cherchée est celle des triangles CHO et DHE ou de CDO et CDE. Mais CDO pouvant être remplacé par CDF, il reste comme différence le triangle EFC qui lui-même est équivalent à EFK.

Ce couple résultant peut donc être représenté par la surface d'un triangle ayant la réaction transversale résultante X*r* comme base et les ampère-tours provenant de l'inducteur comme hauteur ; en d'autres termes, *il est égal au produit des ampère-conducteurs subsistant sur l'induit par le flux qui serait produit si l'excitation due à l'inducteur était la seule existante*.

Dans le cas d'un calage en arrière le couple et la puissance du courant continu sont supérieurs à ceux correspondant au courant alternatif. La commutatrice débite une puissance supérieure à la puissance électrique absorbée, la différence étant fournie par le moteur synchrone qui l'entraîne. Le couple à exercer par ce moteur est celui que nous venons de définir. Une commutatrice calée en avant par contre absorbe plus de puissance qu'elle n'en débite sous forme électrique ; elle travaille comme moteur synchrone.

Il est intéressant de remarquer qu'une commutatrice décalée dont l'inducteur n'est pas excité ne développe pas de couple. Les puissances absorbées et rendues sont égales, mais le rapport de transformation entre les tensions alternative et continue varie toujours avec le cos de l'angle de décalage. Il faut bien distinguer le décalage du flux résultant par rapport à la perpendiculaire à la ligne des balais du décalage entre le courant alternatif et la force électromotrice Ea appliqués aux bagues. Cet angle φ est formé par les directions de Xa et de OEa, la dernière avançant de 90° sur Φ.

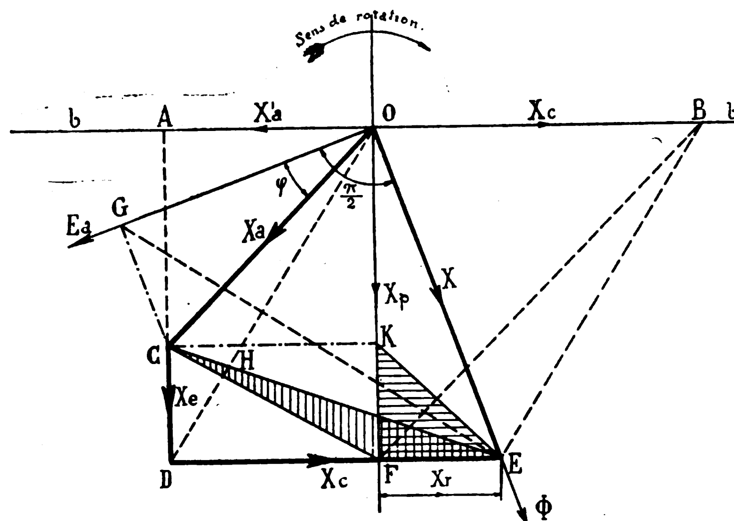


Fig. 4.

Ces résultats étant donnés, il est facile de passer à l'étude de deux commutatrices accouplées rigidement. Nous verrons dans la suite que l'une de ces deux machines est motrice, l'autre génératrice, et nous pouvons poser dès maintenant une condition essentielle pour l'étude du fonctionnement de cette compoundeuse : l'ensemble de ces deux machines tournant à vide, il faut que le couple moteur de l'une annule le couple générateur de l'autre.

Soit ε l'angle de calage entre les deux commutatrices Cd et Cs, et appliquons entre leurs bagues respectivement les tensions alternatives Ead et Eas ayant entre elles un décalage β. Si les balais des deux machines sont posés dans un même plan, nous pouvons dire que les flux résultants Φd et Φs qui font équilibre à Ead et Eas formeront entre eux un angle

$$\theta = \varepsilon + \beta.$$

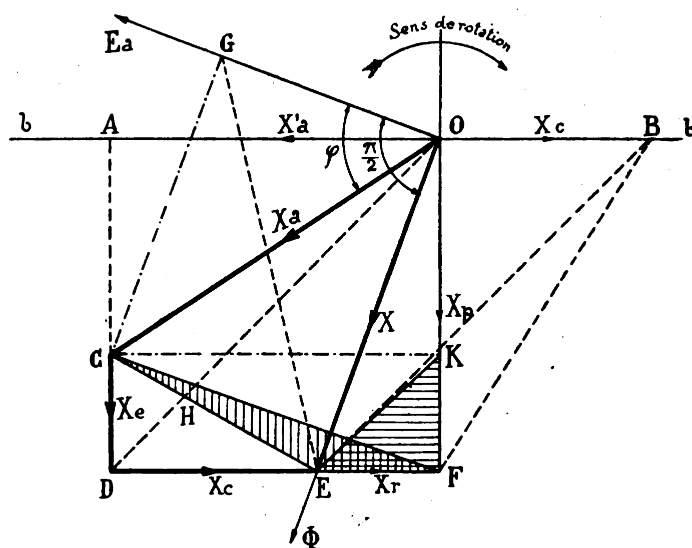


Fig. 5.

Il ne sera rien changé si nous admettons un calage O entre les commutatrices et que nous donnons aux deux tensions un angle de décalage θ.

Nous venons de voir que les couples développés par les deux commutatrices doivent être de sens inverse ; une avance de Ead sur Eas implique donc une avance α_d de Ead et un retard α_s de Eas par rapport à la ligne des balais, et il faut que

$$\theta = \alpha_d + \alpha_s.$$

Admettons deux commutatrices ayant même nombre de spires et même carcasse magnétique, leurs excitations Xed et Xes pouvant être différentes.

Les différences de construction donnent lieu à des corrections très simples qui sont introduites dans la suite. On suppose que les deux machines travaillent sur un même circuit continu, de sorte qu'elles sont parcourues par le même courant continu. Admettons en outre les inducteurs des deux machines excités par une source de courant continu indépendante de sorte que X*ed* et X*es* sont constants.

Les données du problème sont, outre les excitations X*ed* et X*es*, les deux forces électromotrices alternatives E*ad* et E*as*, et par suite les ampère-tours X*d* et X*s*; sont donnés en outre le décalage

$$\theta = \varepsilon + \beta$$

entre E*ad* et E*as* ou entre X*d* et X*s*, ainsi que la résistance R du circuit à courant continu.

Pour trouver la valeur du courant continu I*c* et les grandeurs et directions des courants alternatifs I*ad* et I*as*, juxtaposons les diagrammes des figures 4 et 5 comme il a été fait dans la figure 6. Les couples étant égaux, il faut que les surfaces des triangles ONL et OMK soient égales, donc

$$\mathrm{ON} \times \mathrm{X}ed = \mathrm{OM} \times \mathrm{X}es$$

$$\frac{\mathrm{OM}}{\mathrm{ON}} = \frac{\mathrm{X}ed}{\mathrm{X}es},$$

et de même

$$\frac{\mathrm{OC}}{\mathrm{OB}} = \frac{\mathrm{X}ed}{\mathrm{X}es};$$

donc

$$\mathrm{OC} = \mathrm{OB}\frac{\mathrm{X}ed}{\mathrm{X}es} = \mathrm{X}d\frac{\mathrm{X}ed}{\mathrm{X}es}.$$

Il suffit donc de construire la longueur OC et de joindre C à A pour trouver immédiatement les angles α_d et α_s, et la ligne *bb* des balais en abaissant la perpendiculaire de O sur CA. Les tensions continues E*cd* et E*cs* sont respectivement proportionnelles à DM et AM, ce qui les détermine. Le courant continu est donné par l'expression

$$\mathrm{I}c = \frac{\mathrm{E}cd + \mathrm{E}cs}{\mathrm{R}}$$

ce qui fixe les valeurs de X*cd* et X*cs*; le nombre de spires des deux induits étant le même, on a

$$\mathrm{X}cs = \mathrm{X}cd.$$

Portons OG = X*cd* et AI = X*cs* et construisons les points F et H en portant les longueurs X*ed* et X*es*. Nous trouvons ainsi les valeurs de X*ad* = BF et de X*as* = OH, ce qui permet de calculer les courants alternatifs I*ad* et I*as*. Leurs décalages respectifs ψ_d et ψ_s par rapport aux tensions E*ad* et E*as* sont représentés par les angles entre X*ad* et OE*ad* et entre X*as* et OE*as*.

Passons maintenant au cas du compoundage d'un alternateur; une tension E*ad* est appliquée aux bagues de la commutatrice dérivation C*d*, et la commutatrice série C*s* est parcourue par un courant proportionnel au courant de l'alternateur. Pour plus de simplicité, on suppose que le courant total I*as* traverse l'induit de la commutatrice série sans l'intermédiaire d'aucun transformateur.

Le décalage φ entre E*ad* et I*as* est produit par l'impédance du réseau. Si les deux commutatrices sont décalées entre elles de l'angle ε, les choses se passent comme si le décalage entre E*ad* et I*as* était égal à

$$\vartheta = \varepsilon + \varphi$$

c'est-à-dire que ϑ est l'angle entre E*ad* et I*as* (fig. 6) et $\frac{\pi}{2} + \vartheta$ l'angle de X*d* avec X*as*.

Admettons le cas pratique de la figure 1 où l'excitation des deux commutatrices est soumise à l'action de la somme E*cd* + E*cs* des tensions continues.

Les grandeurs X*ed* et X*es* ne sont plus constantes, elles sont proportionnelles à la somme E*cd* + E*cs*, mais le rapport

$$\frac{Xed}{Xes} = m$$

conserve une valeur fixe.

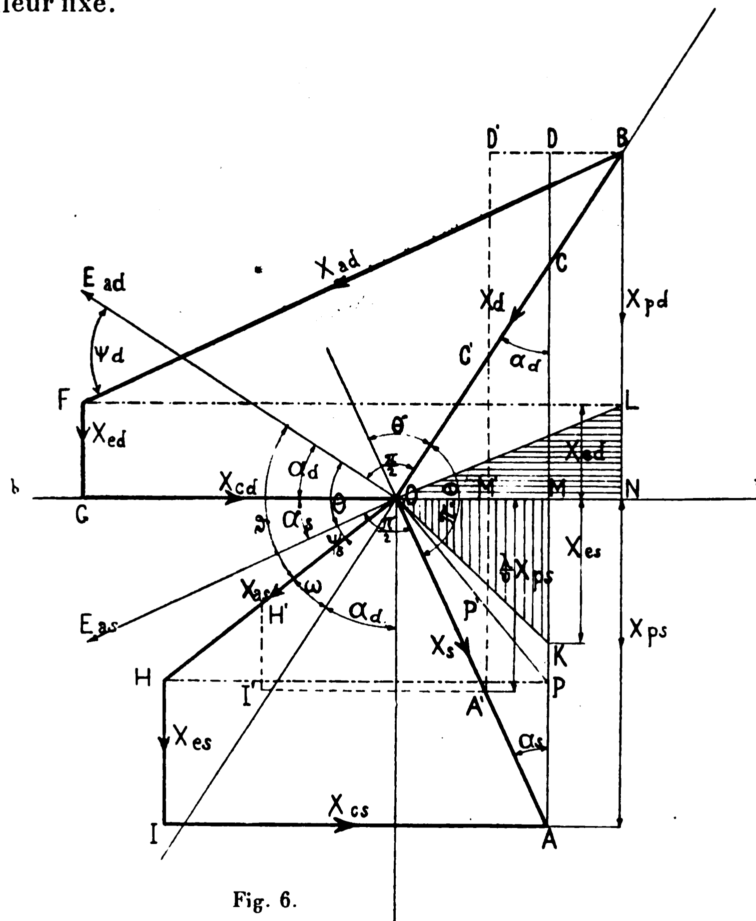


Fig. 6.

Nous connaissons donc, pour construire le diagramme (fig. 6) X*d*, X*as*, l'angle $\frac{\pi}{2} + \vartheta$ entre leurs directions et la valeur de *m*. Nous savons en outre que X*es* = AP est proportionnel à AD et que, en raison de la relation

$$Ic = \frac{Ecd + Ecs}{R},$$

X*cs* = IA = HP est proportionnel à la même longueur.

Posons $HP = k_1 AD$

et $AP = k_3 AD$

donc $AP = k_3 (AP + PM + MD)$

si $\omega = \frac{\pi}{2} - \vartheta$

$$PM = OH\cos(\omega+\alpha_d) = Xas\cos(\omega+\alpha_d)$$

$$MD = Xd\cos\alpha_d;$$

donc
$$AP = \frac{k_3}{1-k_3}[Xas\cos(\omega+\alpha_d)+Xd\cos\alpha_d]$$

et
$$AD = \frac{Xas\cos(\omega+\alpha_d)+Xd\cos\alpha_d}{1-k_3} \qquad (1)$$

de même
$$HP = Xas\sin(\omega+\alpha_d)+OC\sin\alpha_d$$

mais
$$OC = mXd$$

relation déduite de l'égalité des triangles ONL et OMK.

donc
$$HP = Xas\sin(\omega+\alpha_d)+mXd\sin\alpha_d$$

et
$$AD = \frac{Xas\sin(\omega+\alpha_d)+mXd\sin\alpha_d}{k_1}. \qquad (2)$$

Nous déduisons de l'égalité des seconds membres de 1) et 2), en séparant les termes en $\sin\alpha_d$ et $\cos\alpha_d$.

$$\left(\frac{Xas\cos\omega+Xd}{1-k_3}-\frac{Xas\sin\omega}{k_1}\right)\cos\alpha_d = \left(\frac{Xas\sin\omega}{1-k_3}+\frac{Xas\cos\omega+mXd}{k_1}\right)\sin\alpha_d$$

et si
$$1-k_3=k_2$$

$$\sin\alpha_d = \frac{k_1Xas\cos\omega-k_2Xas\sin\omega+k_1Xd}{k_1Xas\sin\omega+k_2Xas\cos\omega+k_2mXd}\cos\alpha_d \qquad (3)$$

d'où l'on tire la valeur de $\operatorname{tg}\alpha_d$. Il est donc facile de construire pour chaque valeur de ω la valeur correspondante de α_d, ce qui permet immédiatement de déterminer toutes les autres grandeurs du diagramme (fig. 6).

Mais ce qui nous intéresse avant tout, c'est de savoir comment varie la somme $Ecd + Ecs$ des tensions continues si le courant Ias de l'alternateur change de grandeur ou de phase.

Les longueurs $AD = Xpd + Xps$ et $OH = Xas$ étant respectivement proportionnelles à $Edc + Ecs$ et à Ias, il s'agit de déterminer la relation

$$\rho = AD = f(Xas, \omega).$$

Or, d'après (2)

$$\rho = \frac{Xas\sin\omega\cos\alpha_d+Xas\cos\omega\sin\alpha_d+mXd\sin\alpha_d}{k_1}$$

$$\rho = \frac{Xas\sin\omega}{k_1}\cos\alpha_d+\frac{Xas\cos\omega+mXd}{k_1}\sin\alpha_d$$

et en tenant compte de (3)

$$\rho = \frac{1}{k_1}\left[Xas\sin\omega+(Xas\cos\omega+mXd)\frac{k_1Xas\cos\omega-k_2Xas\sin\omega+k_1Xa}{k_1Xas\sin\omega+k_2Xas\cos\omega+k_2mXd}\right]\cos\alpha_d$$

mais

$$\cos\alpha_d = \sqrt{\frac{1}{1+\operatorname{tg}^2\alpha_d}}$$

et en substituant la valeur $\operatorname{tg}\alpha_d$ tirée de (3) on a

$$\cos\alpha_d = \frac{k_1Xas\sin\omega+k_2Xas\cos\omega+k_2mXd}{\sqrt{(k_1Xas\sin\omega+k_2Xas\cos\omega+k_2mXd)^2+(k_1Xas\cos\omega-k_2Xas\sin\omega+k_1Xd)^2}}$$

donc

$$\rho^2 = \frac{1}{k_1^2} \frac{[Xas \sin\omega (k_1 Xas \sin\omega + k_2 Xas \cos\omega + k_2 m Xd) + (Xas \cos\omega + m Xd)(k_1 Xas \cos\omega - k_2 Xas \sin\omega + k_1 Xd)]^2}{(k_1 Xas \sin\omega + k_2 Xas \cos\omega + k_2 m Xd)^2 + (k_1 Xas \cos\omega - k_2 Xas \sin\omega + k_1 Xd)^2}$$

en développant et en posant

$$A^2 = k_1 Xas^2 + m k_1 Xd^2$$
$$B^2 = k_1 (1 + m) XdXas$$
$$C^2 = (k_1^2 + k_2^2) Xas^2 + (k_1^2 + m^2 k_2^2) Xd^2$$
$$D^2 = 2 k_1 k_2 (m - 1) XdXas$$
$$E^2 = 2 (k_1^2 + m k_2^2) XdXas$$

on a

$$\rho^2 = \frac{1}{k_1^2} \frac{(A^2 + B^2 \cos\omega)^2}{C^2 + D^2 \sin\omega + E^2 \cos\omega}.$$

Cette courbe représentant ρ en fonction de ω est symétrique par rapport à l'axe OB si le terme en sin ω disparaît, c'est-à-dire si

$$D^2 = 0$$

ou

$$m = 1 \quad \text{et} \quad Xed = Xes.$$

Or pour $m = 1$ les termes de A^2, B^2, C^2 et E^2 prennent les valeurs suivantes :

$$A^2 = k_1 (Xas^2 + Xd^2)$$
$$B^2 = 2 k_1 XdXas$$
$$C^2 = (k_1^2 + k_2^2)(Xas^2 + Xd^2)$$
$$E^2 = 2 (k_1^2 + k_2^2) XdXas.$$

En les introduisant dans l'expression de ρ^2 nous avons :

$$\rho^2 = \frac{k_1^2}{k_1^2 (k_1^2 + k_2^2)} \frac{(Xd^2 + Xas^2 + 2 XdXas \cos\omega)^2}{Xd^2 + Xas^2 + 2 XdXas \cos\omega}$$

$$= \frac{1}{k_1^2 + k_2^2} (Xd^2 + Xas^2 + 2 XdXas \cos\omega)$$

ou

$$(Xpd + Xps)^2 = \left(\frac{Xd}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}}\right)^2 + \left(\frac{Xas}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}}\right)^2 + 2 \frac{XdXas}{(k_1^2 + k_2^2)} \cos\omega$$

$\rho = X_{pd} + X_{ps}$ est donc le troisième côté d'un triangle dont les deux autres sont

$$OH_1 = \frac{Xas}{\sqrt{k_2^1 + k_2^2}} \quad \text{et} \quad OB_1 = \frac{Xd}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}},$$

formant entre eux un angle $\pi - \omega$ (fig. 7). Le courant continu Ic, et avec lui l'excitation de l'alternateur, varient proportionnellement à ρ.

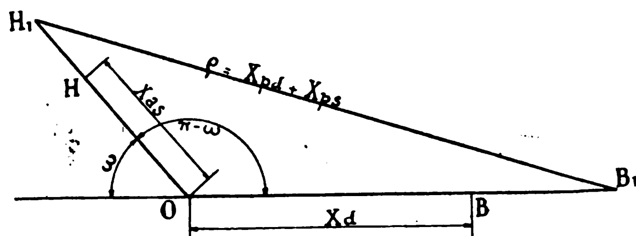


Fig. 7.

Mais la figure 7 est, à une autre échelle, le diagramme de l'alternateur donnant la variation de l'excitation avec la charge, si OB_1 représente les ampère-tours de l'alternateur à vide et OH_1 les contre ampère-tours de son induit proportionnels à Ias, et si l'angle B_1OH_1 a la valeur $\frac{\pi}{2} + \varphi$.

Nous arrivons donc à la conclusion importante que les deux commutatrices identiques

donnent un compoundage exact, si les excitations dues aux inducteurs sont égales, si en outre le rapport des ampère-tours résultants Xd de la commutatrice dérivation aux ampère-tours Xas produits dans la commutatrice série par le courant Ias de l'alternateur, est égal au rapport des ampère-tours à vide de l'alternateur aux contre-ampère-tours produits par le même courant et si enfin l'on a soin de donner à l'angle $\pi - \omega$ la valeur $\frac{\pi}{2} + \varphi$ ou en raison de

$$\omega = \frac{\pi}{2} - \vartheta = \frac{\pi}{2} - \varepsilon - \varphi$$

$$\frac{\pi}{2} + \varepsilon + \varphi = \frac{\pi}{2} + \varphi$$

$$\varepsilon = 0$$

c'est-à-dire si l'angle de calage relatif ε des commutatrices est nul.

Toutes ces conditions sont faciles à réaliser. La tension Ead à appliquer aux bagues de la commutatrice dérivation se détermine de la manière suivante. On a :

$$(Ecd + Ecs)_0 = RIco$$

si les indices o correspondent à la marche à vide de l'alternateur. $(Ecd + Ecs)_0$ fixe la valeur de $(X_{pd} + X_{ps})_0$ d'où on a

$$Xd = (Xpd + Xps)_0 \sqrt{k_1^2 + k_2^2}$$

Xd détermine la valeur de la tension Ead.

Le rapport de Xd à Xas défini plus haut est réglé par le transformateur série.

Il nous reste encore à voir comment les conditions à remplir sont modifiées, si les carcasses magnétiques des deux commutatrices et les nombres de spires sur leurs induits sont différents.

La tension d'une machine à courant continu est donnée par l'expression

$$Ec = kN\Phi = kN \frac{Xp}{\mathfrak{R}}$$

si k désigne un facteur, N le nombre de spires sur l'induit, Φ le flux et Xp les ampère-tours perpendiculaires à la ligne des balais, et si enfin $\mathfrak{R}$ est la réluctance du circuit magnétique sur lequel agit Xp. Nous avons donc

$$Ecd = kNd \frac{Xpd}{\mathfrak{R}d}, \qquad \text{de même} \qquad Ecs = kNs \frac{Xps}{\mathfrak{R}s}.$$

Soit

$$\lambda = \frac{Ns}{Nd}, \qquad \nu = \frac{\mathfrak{R}s}{\mathfrak{R}d}$$

alors :

$$Ecd + Ecs = k \frac{N}{\mathfrak{R}d} \left(Xpd + \frac{\lambda}{\nu} Xps \right).$$

On voit donc que la somme $Ecd + Ecs$ n'est plus proportionnelle à $Xpd + Xps$, mais à $Xpd + \frac{\lambda}{\nu} Xps$.

Faisons (fig. 6)

$$A'M' = \frac{\lambda}{\nu} Xps \qquad \text{et} \qquad M'D' = MD = Xpd$$

de sorte que

$$A'D' = Xpd + \frac{\lambda}{\nu} Xps = \rho'.$$

Toutes les longueurs du polygone OH'I'A' s'obtiennent en réduisant le polygone OHIA dans le rapport $\frac{\lambda}{\nu}$, sans que le polygone OBFG varie. On a en outre

$$OC' = \frac{\lambda}{\nu} OC = m \frac{\lambda}{\nu} OB = \mu X d.$$

Les raisonnements relatifs au polygone OHIA et au rapport m s'appliquent au polygone OH'I'A' et au rapport μ à condition de remplacer C par C' ; nous en concluons immédiatement que pour que le compoundage soit exact avec des commutatrices différentes, il faut que

$$\mu = 1$$

ou

$$m = \frac{\lambda}{\nu}$$

donc

$$\frac{Xed}{Xes} = \frac{Nd}{Ns} \frac{\mathcal{R}s}{\mathcal{R}d}$$

Pour le cas pratique de la figure 1 où les systèmes inducteurs des deux commutatrices, comportant respectivement n_d et n_s spires, sont traversés par le même courant continu i_c et où les carcasses magnétiques sont identiques, il faut que

$$\frac{n_d i_c}{n_s i_c} = \frac{n_d}{n_s} = \frac{Nd}{Ns}$$

c'est-à-dire que les nombres de spires sur les inducteurs doivent être dans le rapport des nombres de spires sur les induits correspondants.

La figure 8 donne la construction à suivre pour arriver à déterminer le diagramme complet. Cette construction est basée sur des valeurs de

$$k_1 = 0{,}25 \qquad k_3 = 0{,}5 \qquad k_2 = 1 - k_3 = 0{,}5$$

$$\frac{1}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} = 1{,}79$$

de

$$\lambda = 1{,}5 \qquad \text{et de} \qquad \frac{\lambda}{\nu} = 0{,}75$$

de sorte que si pour un décalage donné

$$OH = Xas,$$

correspondant à un courant Ias,

$$OH' = 0{,}75\, OH \qquad \text{et} \qquad OH_1 = 1{,}79\, OH',$$

si en outre

$$OB_1 = 1{,}79\, OB = 1{,}79\, Xd,$$

on a

$$\rho' = Xpd + \frac{\lambda}{\nu} Xps = H_1B_1.$$

Pour $\mu = 1$ les points B_1, C' et D' de la figure 6 coïncident. Il faut donc que (fig. 8)

$$A'P' = \frac{\lambda}{\nu} Xes = k_3\, A'B = 0{,}5\, \rho'$$

donc

$$P'B = (1 - k_3)\, A'B = k_2 \rho' = 0{,}5\, \rho'$$

en outre

$$H'P' = k_1\, A'B = k_1 \rho' = 0{,}25\, \rho'$$

H'P' est perpendiculaire à BP' ; décrivons donc sur H'B comme diamètre un cercle, portons $BP' = k_2 \rho'$ et dans son prolongement $BA' = \rho'$. La perpendiculaire bOb de O sur BP' repré-

sente la ligne des balais. Portons H'I' égal et parallèle à P'A' et construisons le polygone OHIA semblable à OH'I'A'.

Sachant que les réactions transversales OG et AI dues au courant continu commun sont proportionnelles aux nombres de spires des induits, nous déduisons

$$OG = \frac{AI}{\lambda} = 0{,}667\ AI$$

en outre

$$\frac{Xed}{Xes} = m = \frac{\nu}{\lambda}$$

donc

$$Xed = \frac{\nu}{\lambda} Xes$$

ou

$$GF = \frac{\nu}{\lambda} IH = 1 \cdot 33\ IH$$

Les deux polygones OGFB et OHIA sont donc complètement déterminés et toutes les grandeurs intéressantes peuvent en être déduites.

On voit que pour le cas présenté, le courant alternatif de la commutatrice dérivation est décalé en avant de l'angle ψ_d, celui de la commutatrice série décalé en arrière de l'angle ψ_s par rapport aux forces électromotrices respectives E*ad* et E*as*.

Portons les valeurs de A'B, de A'P' et de P'B ou à une autre échelle celles des tensions E*cd* + E*cs*, E*cs* et E*cd* respectivement en coordonnées polaires, en faisant varier les angles ω ou φ.

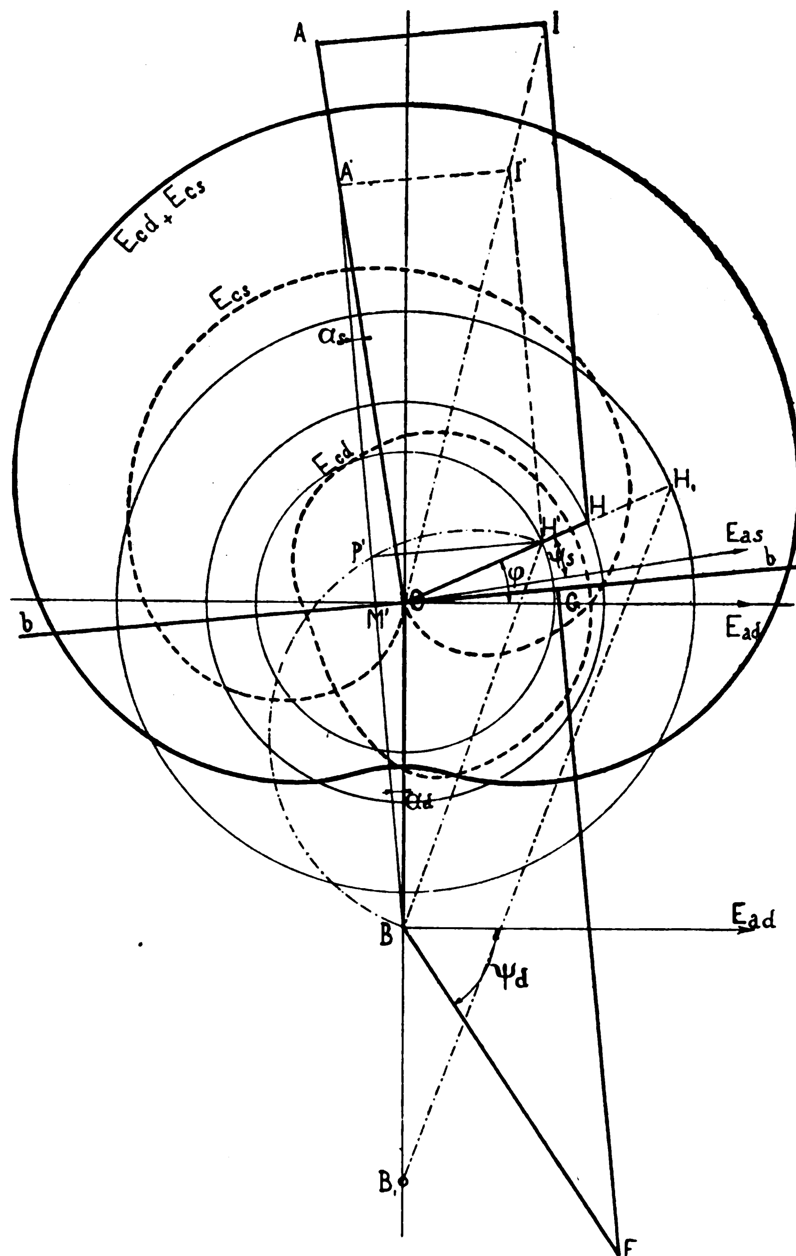


Fig. 8.

Il est intéressant de voir que la courbe symétrique représentant E*cd* + E*cs* est la résultante des deux courbes dissymétriques E*cd* et E*cs*. E*cd* est, pour le cas de la figure 8, presque constant pour toutes les valeurs possibles de ω comprises entre o et π. La variation de la tension E*cd* + E*cs* est due presque uniquement à la variation de E*cs*.

On peut démontrer que la somme des deux tensions continues suit encore la loi de com-

poundage exact si la condition d'excitation des deux commutatrices est une des variantes énoncées au commencement de cette étude.

Le système de compoundage parfait que nous venons de décrire et qui tient à la fois compte des variations du courant et de son décalage par rapport à la tension de la génératrice a été essayé dans les ateliers de la « Société alsacienne de constructions mécaniques ».

Dans la seconde partie de cette étude nous indiquerons les résultats d'essais obtenus.

(A suivre). Édouard ROTH.

LES INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES DE LA VILLE DE SCHAFFOUSE

La Suisse est certainement la nation dont l'industrie a recueilli le plus grand profit de l'utilisation des forces hydrauliques naturelles, si abondantes dans ce pays. Parmi les différentes villes de Suisse, celle dont l'industrie a le plus prospéré grâce à cette utilisation est peut-être celle de Schaffouse.

En 1858, la ville de Schaffouse, frappée par l'intérêt qu'offrirait pour les industries locales l'utilisation des forces hydrauliques du Rhin, fit entreprendre l'étude d'un projet de barrage sur le Rhin. Cette étude, terminée en 1860, fit ressortir la possibilité de capter une puissance de 600 chevaux avec des dépenses totales relativement peu élevées. On s'adressa alors au P[r] Reuleaux pour l'étude du système le plus avantageux de transport à distance de l'énergie mécanique obtenu, et cet ingénieur proposa l'emploi d'une transmission par câbles télédynamiques. Ce projet fut adopté et les travaux commencèrent en 1863.

La digue établie avait une longueur de 203 mètres et une hauteur de $2^m,30$ environ : elle était faite avec des sapins ancrés par des tiges de fer dans le lit du fleuve. Cette digue était munie de trois orifices de décharge de 3 mètres de largeur sur 2 mètres de hauteur, permettant un débit maximum de 50 mètres cubes par seconde. Le canal de décharge, en tunnel, était creusé dans le lit du fleuve et avait une longueur de 205 mètres, une largeur de 6 mètres et une profondeur moyenne de 4 mètres.

L'usine hydraulique fut établie contre la rive gauche : elle s'appuyait sur deux pylônes et contenait trois turbines, l'une de 200 chevaux, l'autre de 260 chevaux et la troisième de 300 chevaux ; la puissance disponible totale de l'eau captée était de 700 chevaux environ.

L'énergie mécanique était transmise de la rive gauche à la rive droite du Rhin au moyen de câbles, puis, après un renvoi avec engrenages d'angle, était transmise le long de la rive droite du fleuve par de nouveaux câbles, passant sur des pylônes intermédiaires et sur des pylônes de station, où des câbles secondaires, ou bien des arbres, transmettaient l'énergie mécanique aux intéressés. La figure 1 représente le pylône de la rive droite où s'effectuait le changement de direction à angle droit de la transmission. La figure 2 représente un pylône sur lequel était établie une station, et l'on y voit l'arbre de transmission, attaqué par deux roues d'angle, au moyen duquel l'énergie mécanique était transmise au consommateur.

L'installation hydraulique et la transmission télémécanique furent mises en service en 1866. On juge facilement, avec l'expérience acquise maintenant, de ce que cette transmission télédynamique, avec tous ses renvois, ses paliers et ses engrenages, pouvait exiger d'en-

tretien et absorber, en pure perte, d'énergie mécanique [1]. Néanmoins cette très remarquable installation, tout à fait audacieuse pour l'époque à laquelle elle fut exécutée, ne fut arrêtée qu'en 1900, c'est-à-dire au bout de 34 ans de fonctionnement ininterrompu.

En 1886, l'installation hydraulique primitive et la transmission télémécanique étaient devenues tout à fait insuffisantes pour répondre aux demandes toujours croissantes d'énergie. La Société exploitante décida donc la construction d'une seconde usine hydraulique contenant cinq turbines de 300 chevaux. Cette usine fut établie à 140 mètres en aval de la précédente, son canal d'amenée passant au-dessus de l'ancien. On mit en service en 1890 deux turbines entraînant des dynamos génératrices hexapolaires destinées à alimenter

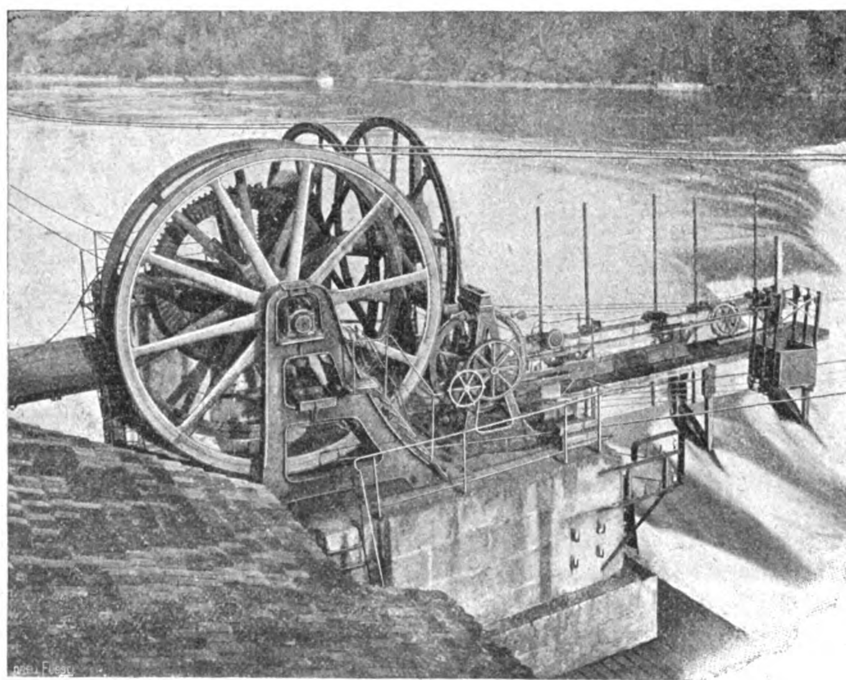


Fig. 1. — Ancien pylone I.

les installations électriques de la filature de Schaffouse : ces dynamos génératrices, des Ateliers d'Oerlikon, appartenant à la filature, produisent du courant continu à 700-750 volts et absorbent chacune 300 chevaux. Chaque turbine Jonval, construite par J. Rieter, a une puissance de 350 chevaux à la vitesse de rotation de 60 tours par minute pour un débit de 8900 à 8000 litres par seconde et une hauteur de chute de $4^m,20$ à $4^m,80$. La hauteur de chute diminuant beaucoup en été, à l'époque des hautes eaux, les turbines furent munies de deux couronnes d'aubages : aux basses eaux, la couronne extérieure seule est en service ; aux hautes eaux, les deux couronnes travaillent simultanément. Le diamètre extérieur de ces turbines est de $3^m,40$. Les couronnes fixes portent 40 aubes directrices ; les roues mobiles, dont le plan inférieur est situé à $1^m,40$ au-dessus du niveau le plus bas, portent 42 aubes.

Chaque turbine, à arbre vertical, entraîne une dynamo génératrice au moyen d'un engre-

[1] Sur le projet, établi en 1861, Reuleaux indiquait comme valeur des pertes d'énergie dans la transmission 3,5 °/₀ et, au maximum, 5 °/₀. Il est inutile d'ajouter que les résultats expérimentaux ne concordèrent pas avec ces chiffres.

nage à roues coniques et d'une poulie à gorge de 4 mètres de diamètre portant des câbles à dix brins.

Un tableau de distribution, muni des appareils de commande et de réglage nécessaire, complète cette installation partielle qui est séparée du reste de l'usine.

En 1891, furent mises en service les trois autres turbines de 300 chevaux de la nouvelle usine d'aval. Deux d'entre elles furent accouplées plus tard à des alternateurs des Ateliers d'Oerlikon produisant du courant monophasé à 2000 volts. Ces deux turbines Jonval, construites par Escher Wyss, sont établies normalement pour une hauteur de chute de

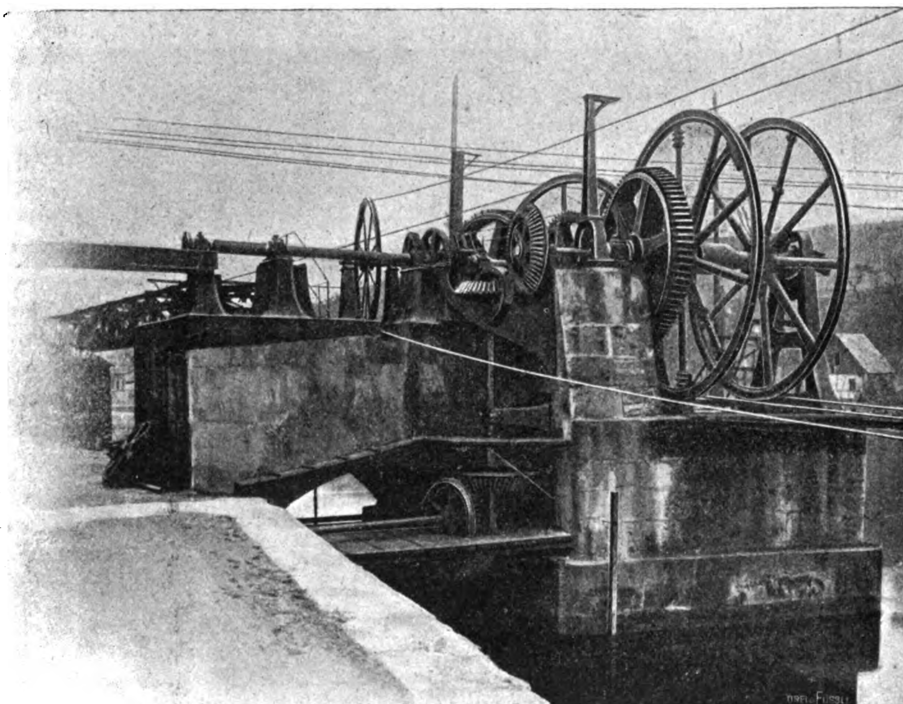


Fig. 2. — Station sur l'ancien pylone IV.

4^{m},50 et un débit de 6800 litres par seconde. Les roues mobiles portent aussi deux couronnes, à 36 et 24 aubes. La roue extérieure seule est utilisé pendant les basses eaux, et les deux roues travaillent ensemble pendant les hautes eaux.

Ces turbines n'ayant pas été construites, à l'origine, en vue de l'entraînement de générateurs électriques, on fut obligé d'employer une transmission intermédiaire. L'arbre vertical des turbines attaque, par engrenages coniques, un arbre horizontal entraînant le rotor de chaque alternateur. Ceux-ci sont à fer tournant et sont établis pour absorber 300 chevaux à la vitesse de 167 tours par minute : ils produisent 1000 ampères sous 2000 volts à la fréquence de 50 périodes par seconde. La figure 3 en donne une vue. Leur rendement est de 92 °/₀ à demi-charge et de 87 °/₀ à pleine charge. Ces machines ont été mises en service en 1896. Le rotor de chaque alternateur est constitué par un volant portant à sa périphérie 36 épanouissements polaires en tôles montés deux par deux vis-à-vis l'un de l'autre. Le diamètre extérieur du fer tournant est de 2660 millimètres ; le diamètre d'alésage du stator est de 2668 millimètres. Les tôles boulonnées dans une carcasse en quatre parties portent

2 × 36 bobines d'induit, composées chacune de sept spires d'un ruban de cuivre de 25 millimètres de largeur et $1^{mm},4$ d'épaisseur. La bobine inductrice est fixée dans la carcasse en fonte entre les deux moitiés de l'induit et consiste en 305 tours de fil de cuivre de 7 millimètres de diamètre. Chaque alternateur est muni de son excitatrice, dont la plaque de fondation est venue de fonte avec le bâti. Cette excitatrice est bipolaire et produit 120 ampères sous 50 volts à la vitesse de 420 tours par minute : elle est actionnée par quatre câbles de 15 millimètres entraînés par une poulie à gorge clavetée sur l'arbre de l'alternateur.

Le courant alternatif produit ainsi à l'usine d'aval était transmis par un réseau de câbles souterrains à plusieurs postes de transformation, d'où un réseau secondaire le distribuait aux abonnés.

A cette époque (1897) la société exploitante décida de supprimer la transmission télémécanique qui fonctionnait toujours, mais dont le rendement devenait de plus en plus mauvais et les frais d'entretien de plus en plus élevés, et de la remplacer par une transmission d'énergie

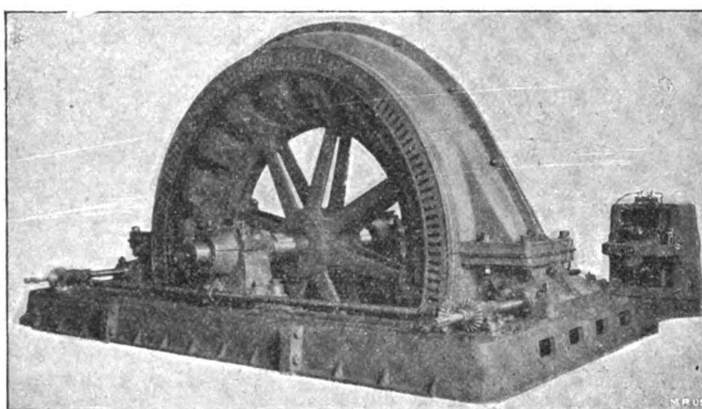


Fig. 3. — Alternateur monophasé Oerlikon.

électrique. L'année suivante, la commune de Schaffouse racheta à la société ses deux usines d'amont et d'aval et décida de faire les transformations nécessaires, pour une exploitation rationnelle. Ces transformations comprenaient le remplacement des trois turbines de l'usine primitive d'amont par des turbines neuves et l'établissement d'alternateurs triphasés commandés par ces turbines, et le remplacement de la cinquième turbine de l'usine d'aval avec établissement, dans cette usine, d'un alternateur monophasé et triphasé pouvant servir de réserve pour l'une ou l'autre usine. Ces travaux de transformation et d'installation furent confiés aux Ateliers d'Oerlikon.

La transmission télédynamique fut arrêtée et démontée en 1900; les pylônes de cette transmission existent encore. L'ancienne usine d'amont fut démolie et reconstruite sur le même emplacement. En décembre 1900 les travaux étaient achevés, et en janvier 1901 l'installation était mise en service. La figure 4 indique l'aspect des deux usines génératrices hydro-électriques vues de la rive droite du Rhin. Ces usines ont atteint rapidement leur limite de production.

Le troisième alternateur, établi dans l'usine génératrice d'amont, et entraîné par une nouvelle turbine, est également à fer tournant et peut absorber 350 chevaux à la vitesse de 167 tours par minute. Sa puissance en courant monophasé est de 210 kilovolt-ampères à

2 000 volts et sa puissance en courants triphasés est de 300 kilovolt-ampères ou 2 000 volts. La fréquence est de 50 périodes. L'induit comprend deux moitiés en série. Chaque moitié porte 108 encoches et 54 bobines de 18 spires formées chacune de deux fils en parallèle de $4^{mm},4$ de diamètre nu. La bobine inductrice comprend 300 tours de ruban de cuivre de 60×1 millimètres : chaque tour est isolé du voisin par un ruban d'amiante de $0^{mm},5$ d'épaisseur. Le rotor porte 36 pôles disposés deux à deux en face l'un de l'autre. L'excitatrice produit 120 ampères sous 50 volts à 420 tours. L'induit a 270 millimètres de longueur et 240 millimètres de diamètre ; il porte 54 encoches de $6,8 \times 25$ millimètres contenant

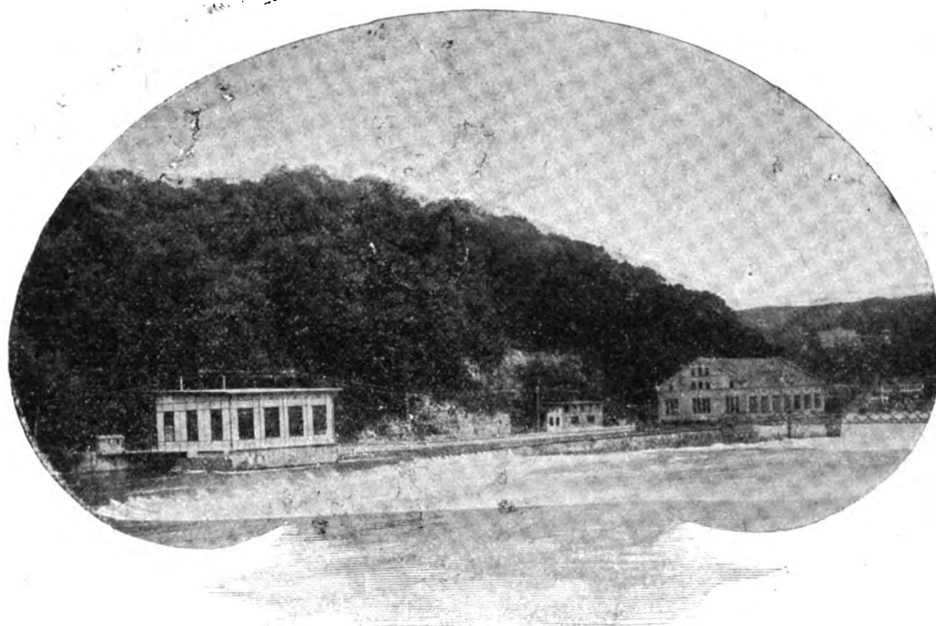


Fig. 4. — Vue des deux stations centrales (depuis la rive droite du Rhin).

chacune quatre conducteurs composés de quatre fils de $2^{mm},2$ de diamètre nus. Le diamètre d'alésage des inducteurs est de 248 millimètres. Chaque bobine inductrice contient 1 200 tours de fil de $1^{mm},6$ de diamètre.

L'usine génératrice contient encore deux groupes convertisseurs transformant les courants triphasés en courant continu pour le service de la traction électrique des tramways. Ces groupes comprennent chacun un moteur triphasé de 150 chevaux à 490 tours par minute fonctionnant sous 2000 volts, et une dynamo génératrice produisant 182 ampères sous 550 volts. Le stator d'un moteur triphasé a un diamètre d'alésage de 900 millimètres et porte 144 rainures contenant chacune huit conducteurs de $4^{mm},4$; le rotor a un diamètre de 898 millimètres et porte 180 encoches contenant chacune un conducteur formé de quatre fils de 4 millimètres. La dynamo d'un groupe convertisseur est entraînée par le moteur par l'intermédiaire d'un accouplement élastique. L'induit a une longueur de 330 millimètres et un diamètre de 745 millimètres ; il porte 200 encoches de 6×30 millimètres contenant chacune deux moitiés de bobines à trois fils de $3^{mm},6$ en parallèle. Le diamètre d'alésage des inducteurs est de 761 millimètres. Il y a six pôles portant chacun 3 300 tours de fil de

1^{mm},6 et un enroulement série de 3,5 tours de ruban de cuivre de 1,5 × 100 millimètres.

Une batterie travaille en parallèle avec les groupes convertisseurs pour assurer le service de traction : elle comprend 276 éléments de 165 ampère-heures.

On a établi plusieurs tableaux de distribution, dont l'un à courant continu, l'autre à courant monophasé et le troisième à courants triphasés, relié par deux feeders souterrains à l'usine d'amont. Ces tableaux portent tous les appareils nécessaires

L'usine d'amont, bâtie en fer et en briques sur les piliers de l'ancienne usine, utilise une hauteur de chute de 3^{m},50 aux hautes eaux et 4^{m},50 aux basses eaux. Elle contient trois turbines de 350 chevaux : l'une d'elles entraîne un alternateur triphasé appartenant à la ficellerie de Schaffouse : les deux autres entraînent les alternateurs triphasés qui alimentent le réseau de distribution d'énergie électrique.

La vitesse de rotation des turbines est de 60 tours par minute, pour un débit de 8200 litres environ par seconde.

L'alternateur triphasé Oerlikon de la ficellerie est entraîné par l'arbre vertical de la turbine au moyen d'engrenages coniques attaquant un arbre horizontal qui commande l'arbre du rotor. Il produit 420 ampères par phase sous 400 volts composés, à la fréquence de 51 périodes par seconde. Chaque demi-induit porte 108 encoches et 54 bobines comprenant huit spires de 4 fils de 4^{mm},8. La bobine inductrice consiste en 166 tours de ruban de cuivre de 60 × 2 millimètres : le rotor porte 36 pôles. L'excitatrice tétrapolaire, directement accouplée à l'alternateur, produit, à la vitesse de 170 tours par minute, 170 ampères sous 40 volts. L'induit a 280 millimètres de longueur et 450 millimètres de diamètre : il porte 136 encoches de 5 × 20 millimètres contenant chacune deux fils de 3^{mm},4 en parallèle. Le diamètre d'alésage des inducteurs est de 460 millimètres. Chacune des quatre bobines inductrices comprend 500 tours de fil de 3^{mm},2.

Les deux autres générateurs triphasés, entraînés également par l'intermédiaire de pignons d'angle, produisent 300 kilowatts pour cos $\varphi = 8$: la tension est de 2000 volts et la fréquence est de 50 périodes. Chaque demi-induit porte 108 encoches et 54 bobines comprenant chacune 16 spires de deux fils de 4^{mm},4 en parallèle. Le rotor porte 36 pôles : l'enroulement inducteur comprend 300 tours de ruban de cuivre de 60 millimètres carrés.

Les excitatrices tétrapolaires produisent 140 ampères sous 50 volts.

Toutes les parties mécaniques de ces machines ont été prévues pour pouvoir supporter une vitesse double de la vitesse normale. Un dispositif spécial, installé dans l'usine, fonctionne au moment d'une décharge brusque totale des alternateurs, pour éviter l'emballement. Ce dispositif consiste dans un interrupteur automatique qui ferme les alternateurs sur un rhéostat liquide, où ils débitent une certaine puissance, de façon à freiner électriquement les masses en mouvement, jusqu'à l'arrêt si cela est nécessaire.

En temps normal, le réseau de distribution d'éclairage est alimenté par les deux alternateurs monophasés de la station d'aval et le réseau de distribution de force motrice par les deux alternateurs triphasés de la station d'amont. L'alternateur monophasé-triphasé de la station d'aval sert de réserve à l'un ou l'autre des circuits.

La distribution du courant monophasé, amené de l'usine par six feeders, est faite au moyen de câbles biconcentriques posés dans des canaux de céramique enterrés dans des fosses. Les dérivations sur les câbles secondaires sont faites au moyen de boîtes de raccordement en fonte. Il n'y a pas de dérivation sur les câbles primaires en dehors des postes de transformateurs. Ces postes abaissent la tension de 2000 à 120 volts : ils sont généralement établis dans des kiosques en fer. Au centre de la ville, on a établi un poste souterrain plus important, contenant quatre transformateurs. Les kiosques contiennent généralement un

transformateur monophasé de 20 kilowatts. Le réseau d'éclairage alimente aussi quelques moteurs de faible puissance.

Le réseau triphasé est alimenté par deux feeders et est établi en câbles souterrains torsadés placés dans des canaux en poterie, semblables à ceux du réseau d'éclairage. Les départs de câbles s'effectuent dans un certain nombre de postes, qui distribuent les courants triphasés à haute et basse tensions suivant la puissance du ou des moteurs alimentés. Tous les gros moteurs sont branchés sur la tension de 1900 volts: plusieurs d'entre eux ont une puissance de 150 chevaux. Un moteur de 50 chevaux et un moteur de 35 chevaux fournissent la force motrice nécessaire à la station de pompes qui élève l'eau potable de la ville, eau provenant d'une nappe souterraine.

L'alternateur triphasé de la station d'amont, appartenant à la ficellerie de Schaffouse, alimente un transformateur de 5 kilowatts qui abaisse la tension à 120 volts pour l'éclairage, six moteurs de 50 chevaux et un moteur de 35 chevaux: chacun de ces moteurs entraîne l'arbre de transmission d'un atelier.

La filature de Schaffouse, qui, par une ligne aérienne traversant le Rhin, reçoit le courant continu produit à 700 volts par deux génératrices, emploie ce courant à la commande d'un moteur de 135 chevaux, cinq moteurs de 60 chevaux, deux moteurs de 30 chevaux et quelques petits moteurs.

Le courant continu à 550 volts produit dans la station d'aval sert à l'alimentation du tramway électrique reliant Schaffouse à Neuhausen, tramway entièrement établi par les Ateliers d'Oerlikon et mis en service en 1901 avec 4 kilomètres de ligne environ. La voie de ce tramway est à écartement de un mètre et est établie en rails Phœnix, de $42^{kgr},4$ par mètre courant, éclissés électriquement au moyen de contacts plastiques Edison-Brown placés sous les éclisses en fer. La ligne aérienne de contact est formée par un fil de 8 millimètres de diamètre: les organes de prises de courant sont des perches à trôlets ordinaires. Chaque voiture est munie de deux moteurs Oerlikon de 24 chevaux.

Comme on le voit par ce rapide aperçu, les installations de la ville de Schaffouse, anciennes et nouvelles, méritaient d'être décrites.

J. Reyval.

REVUE INDUSTRIELLE ET SCIENTIFIQUE

THÉORIES ET GÉNÉRALITÉS

***Sur la radioactivité des minéraux et des sels de thorium.* — B. Boltwood.** — *Physikalische Zeitschrift*, 15 juillet 1906.

L'auteur a déterminé la radioactivité des différents minéraux d'après une méthode semblable à celle de Mac Coy. Les minéraux étaient pulvérisés, dans un mortier en agathe, avec du chloroforme distillé. La pâte ainsi obtenue était étendue, avec un pinceau en poils de chameau, sur une plaque mince en aluminium de $7^{cm},5$ de largeur, 9 centimètres de longueur et $0^{mm},1$ d'épaisseur, pesant 2 grammes environ. Après évaporation du chloroforme, il est possible de déterminer l'augmentation de poids due à la pellicule: celle-ci était très mince et ne pesait guère que 5 milligrammes, répartis sur une surface de 60 centimètres carrés.

L'ionisation produite par la pellicule était mesurée dans deux électroscopes différents. Le plus petit était muni d'une chambre d'ionisation de 16 centimètres de longueur, $9^{cm},5$ de largeur et 7 centimètres de hauteur avec une plaque chargée de 13 centimètres de longueur et 5 centimètres de largeur suspendue à $3^{cm},5$, du fond. Le plus grand avait une chambre d'ionisation

de 15 à 19 centimètres de diamètre et 14 centimètres de hauteur, avec une plaque circulaire de $7^{cm},5$ de diamètre placée à $9^{cm},5$, du fond. Les électroscopes étaient d'un modèle particulier.

Les résultats obtenus par l'auteur dans ses mesures de l'activité des oxydes de thorium sont les suivants :

1° L'activité spécifique du thorium en état d'équilibre est constante ;

2° Le radiothorium est un produit de décomposition du thorium ordinaire ;

3° Certains des sels de thorium de commerce ne contiennent qu'environ la moitié de la quantité de radiothorium correspondant à l'équilibre du thorium ;

4° La modification subie par le thorium pendant sa décomposition et la formation de radiothorium n'émettent vraisemblablement pas de rayons.

Les résultats présentèrent un certain nombre de particularités intéressantes au point de vue de l'activité du thorium. L'activité des oxydes obtenus au moyen des sels de thorium du commerce a été trouvée égale à la moitié environ de celle d'oxydes préparés avec les minéraux naturels du thorium ou contenus dans ces minéraux. Il en résulte évidemment que le traitement chimique auquel sont soumis les sels du commerce provoque la séparation d'environ la moitié des parties constitutives radioactives. Si l'on suppose que l'activité des sels de thorium doit être attribuée à la présence de radiothorium et de ses produits de décomposition, on doit admettre que, dans les sels de faible activité, la moitié environ du radiothorium existant en totalité a été séparée de ces sels. D'après les chiffres donnés par Hahn, on doit admettre que, dans la méthode de séparation au moyen de laquelle il a obtenu son radiothorium, 2 °/₀ au maximum de la totalité de ce corps avaient été séparés du minéral. La méthode industrielle de préparation des sels de thorium purs est donc beaucoup plus efficace au point de vue de la séparation du radiothorium.

Le fait que l'activité spécifique du thorium existant dans les minéraux est constante prête un sérieux appui à la théorie d'après laquelle le radiothorium est un produit de décomposition du thorium ordinaire.

Les résultats obtenus dans cette étude ont aussi une importance directe pour l'hypothèse de Hoffmann et Zerban d'après laquelle l'activité du thorium contenu dans un minéral dépend de la quantité d'urane existant dans celui-ci. Il existe une grande différence dans la teneur en urane des deux minéraux, la thorianite et la thorite : le premier contient en effet presque dix-huit fois plus d'urane que l'autre : cependant l'activité spécifique de thorium a été trouvée la même dans les deux minéraux. Il en est de même pour le thorium contenu dans l'orangite et dans la thorite.

Un point important, concernant les propriétés chimiques du radiothorium, reste à mentionner. Ramsay a indiqué que l'oxalate de radiothorium est insoluble dans un excédent d'oxalate d'ammonium. Quand le radiothorium est accompagné de thorium, son oxalate est facilement soluble dans une solution d'oxalate d'ammonium. L'insolubilité du radiothorium dans la préparation employée par Ramsay et ne contenant pas de thorium provenait vraisemblablement de la formation d'une combinaison chimique d'un genre particulier, différente des phénomènes ordinaires de solution ou de précipitation.

B. L.

Sur la radioactivité des sels de radium. — **B. Boltwood.** — *Physikalische Zeitschrift*, 15 juillet 1906.

La relation entre l'activité des rayons α d'un sel de radium, dont toute l'émanation, ainsi que les produits actifs de décomposition, ont été éloignés, et l'activité des rayons α du même sel quand la totalité de l'émanation et des produits actifs correspondant à l'équilibre sont encore présents, n'a pas encore été déterminée avec exactitude. D'après Mme Curie, l'activité maxima qu'atteignent des sels de radium au bout de plusieurs mois est cinq ou six fois supérieure à celle qu'ils possèdent immédiatement après leur préparation.

L'auteur a employé une préparation de chlorure de baryum radifère, présentant une activité égale à 100 fois celle de l'urane, et obtenue depuis six mois environ par traitement chimique et cristallisations répétées de chlorure. On avait préparé ce corps radioactif, non en vue d'obtenir une forte activité, mais en vue de séparer tout l'actinium et le polonium pouvant exister dans les matières premières employées. Quelques milligrammes de ce sel furent dissous dans 250 centimètres cubes d'eau distillée, à laquelle

on avait ajouté quelques gouttes d'acide chlorhydrique étendu. Dix centimètres cubes de cette solution furent placés dans une ampoule en verre et étendus dans 100 centimètres cubes d'eau, puis l'ampoule fut soudée. Deux mois environ après, l'émanation et les autres gaz contenus dans la solution furent enlevés par ébullition, et la solution fut placée dans un électroscope. La perte de charge au bout de trois heures était de 4,60 divisions par minute. Cela correspondait à une quantité de radium de $8,5 \times 10^{-6}$ milligrammes, ou à une teneur de $8,5.10^{-7}$ milligrammes de radium par centimètre cube de la solution primitive.

On prépara un certain nombre de pellicules très minces de sel de radium en plaçant dans de petits cristallisoirs de 50 millimètres de diamètre et 9 millimètres de profondeur 10 centimètres cubes de solution normale que l'on laissait sécher lentement. Les couches fraîchement préparées de cette façon furent placées dans un électroscope, et leur activité fut mesurée. La chambre d'ionisation avait 14 centimètres de hauteur, 15 centimètres de diamètre en bas et en haut et 19 centimètres de diamètre au milieu. Un disque d'aluminium de $7^{cm},5$ de diamètre était suspendu à $9^{cm},5$ au-dessus du fond : il était tenu par une tige verticale isolée en laiton traversant la partie supérieure de la chambre d'ionisation et portant à sa partie supérieure une petite feuille d'or entourée d'une enveloppe métallique munie d'une fenêtre en mica. La plaque isolée pouvait être chargée à un potentiel de 400 volts environ au moyen d'une batterie d'accumulateurs : la perte de charge de la plaque était mesurée par la chute de la feuille d'or observée au moyen d'un microscope à échelle transparente. La moitié inférieure de la chambre d'ionisation pouvait être tournée sans que rien fût modifié au reste de l'appareil, et l'on pouvait enlever ou introduire ainsi sur le fond les cristallisoirs contenant les substances à essayer. Dans la position normale fermée de la chambre d'ionisation, le fond était maintenu par trois petites bornes à ressorts. Toute la caisse métallique de l'électroscope était reliée électriquement à la terre, ainsi que le pôle positif de la batterie. La plaque isolée était chargée négativement dans toutes les expériences.

Après avoir déterminé l'activité initiale de la pellicule, on plaçait celle-ci dans une cloche hermétique au-dessus d'acide sulfurique concentré. Les mesures n'étaient faites que par temps froid et sec quand l'atmosphère du laboratoire présentait un minimum d'humidité. Pour faire une expérience, on retirait le cristallisoir de la cloche, on le plaçait immédiatement dans l'électroscope, et l'on effectuait la mesure aussi rapidement que possible. Le cristallisoir était remis alors sous la cloche jusqu'à l'expérience suivante.

Les activités initiales des différentes pellicules et leurs activités après des temps donnés sont indiquées dans le tableau I, en fonction de la chute de la feuille d'or, en divisions de l'échelle par minute. Les lectures ont été corrigées dans chaque cas des pertes de charge de l'air de l'appareil.

TABLEAU I

PELLICULE N°	ACTIVITÉ INITIALE	ACTIVITÉ AU BOUT DE
1	1,14	3 jours 22 heures : 3,02.
2	1,20	12 jours : 4,24. 31 jours : 5,21.
3	1,12	17 jours : 4,60.

Après la dernière mesure, l'auteur plaçait le cristallisoir avec la pellicule rapidement sur le fond d'un petit récipient en cuivre de 300 centimètres cubes de capacité environ. Le récipient était fermé par un couvercle portant deux ouvertures auxquelles étaient fixés des tubes de verre.

L'un de ces tubes était relié, au moyen d'un tube de caoutchouc à un appareil de Reichardt ; l'autre tube, qui allait presque jusqu'au fond du récipient, permettait d'aspirer à peu près la moitié de l'air. Environ 150 centimètres cubes d'eau chaude avec un peu d'acide chlorhydrique étaient introduits dans le tube qu'on reliait à une bouteille d'eau bouillante. Un courant de vapeur traversait donc le récipient, et les gaz entraînés étaient accumulés dans l'appareil de Reichardt. Au bout de 15 minutes environ, ces gaz étaient placés dans l'électroscope hermétique. L'activité des émanations provenant de la pellicule est indiquée dans le tableau II en fonction de la chute de la feuille d'or en divisions par minute. La teneur en émanation totale dans chaque pellicule fut calculée d'après la chute observée et la chute produite par l'émanation to-

tale relative à l'état d'équilibre (4,60 divisions par minute).

TABLEAU II

PELLICULE N°	CHUTE OBSERVÉE	TENEUR EN ÉMANATION
1	1,65	35,9 %
2	3,29	71,5
3	3,07	66,5

Connaissant le temps écoulé entre l'instant de l'enlèvement complet de l'émanation du sel et l'instant où l'on mesurait l'émanation restant dans la pellicule, on peut calculer la proportion d'émanation réellement retenue par le sel. Le tableau III indique dans la première colonne la portion d'émanation totale (en %) contenue dans la pellicule, dans la deuxième colonne la portion de l'émanation totale que l'on trouverait au bout d'un certain temps s'il n'y avait pas eu d'émanation enlevée, et dans la troisième colonne le rapport de ces deux quantités, ou la portion d'émanation formée retenue par la pellicule.

TABLEAU III

PELLICULE N°	1	2	3
1	35,9 %	50 %	71,8 %
2	71,5	100	71,5
3	66,5	95	70,2

Ces chiffres montrent que, dans les pellicules employées, le sel de radium ne retient que 70 à 71,8 % de l'émanation de radium qui se forme en son sein.

L'accroissement d'activité due à l'accumulation de certaines quantités d'émanation et de produits de décomposition étant donné par le tableau I, on peut calculer l'activité que les pellicules auraient finalement atteinte s'il ne s'était pas dégagé d'émanation. Par exemple, pour la pellicule 1, la différence entre l'activité initiale et l'activité au bout de trois jours et 22 heures est 1,88. Cela représente l'activité provenant de 35,9 % de l'émanation et des produits actifs. Donc, 100 % d'émanation et de produits actifs présenteraient une activité de 5,23 divisions par minute, et la valeur maxima de cette activité serait 1,14 + 5,23 c'est-à-dire 6,37. Si l'on divise ce chiffre par l'activité initiale 1,14, on obtient le chiffre 5,59 comme valeur du rapport.

Les chiffres correspondants pour les trois pellicules sont donnés par le tableau IV.

TABLEAU IV

PELLICULE N°	ACTIVITÉ INITIALE	ACTIVITÉ FINALE	ÉMANATION RESTANT en %	ACTIVITÉ DE 100 % d'émanation.	ACTIVITÉ quand toute L'ÉMANATION reste.	RAPPORT
1	1,14	3,02	35,9	5,23	6,37	5,59
2	1,20	5,21	71,5	5,61	6,81	5,68
3	1,12	4,60	66,5	5,23	6,35	5,67

La valeur moyenne du rapport de l'activité du sel débarrassé de l'émanation à l'activité du sel avec toute l'émanation est, d'après ce qui précède, 5,64.

L'augmentation d'activité d'une pellicule de bromure de radium pur fut également déterminée par évaporation d'une solution de bromure de radium pur contenant un peu d'acide chlorhydrique. L'activité de la pellicule fraîchement préparée fut mesurée, puis le cristallisoir fut exposé pendant six semaines dans un dessiccateur à l'action de l'acide sulfurique. L'activité fut alors déterminée à nouveau : elle avait augmenté à 3,1 fois la valeur de l'activité initiale. La pellicule ne contenait que 45 % de l'activité qui s'y était formée.

Conclusion. — Les distances d'action des particules α du radium et de ses produits de décomposition pour une modification rapide dans l'air à la pression atmosphérique ont été déterminées par Bragg et Kleeman. Ces auteurs ont trouvé les valeurs suivantes.

TABLEAU V

1. Radium.	3,5 cm.
2. Émanation ou radium A.	4,23
3. Radium A ou émanation.	4,83
4. Radium C..	7,06

Le somme de ces chiffres est égale à 19,62 ; ce nombre est 5,60 fois plus grand que la distance d'action des particules α du radium lui-même La valeur trouvée pour l'ionisation relative ou l'activité des différents produits, 5,64, concord

si exactement avec le rapport de distances d'action de ces mêmes produits qu'il est tout à fait vraisemblable que les activités des rayons α des différents produits sont proportionnelles aux distances d'action de leurs particules α. En outre, d'après la théorie de la décomposition, quand la substance mère et les produits de décomposition sont en état d'équilibre radioactif, le même nombre d'atomes de chacun des produits se décompose par seconde, et le même nombre de particules α de chaque atome est émis : il semble donc vraisemblable que l'ionisation produite par chaque particule α est proportionnelle à sa distance d'action. Le fait que l'ionisation mesurée était presque entièrement produite par les particules α est mis en évidence par l'expérience suivante : l'une des pellicules fut recouverte d'une feuille d'aluminium de $0^{mm},1$ d'épaisseur après avoir atteint son activité maxima, et l'ionisation produite fut environ 0,3 % de celle produite par la pellicule non recouverte.

B. L

Sur le pouvoir émissif et la température du manchon Auer pour différentes teneurs en cérium. — H. Rubens. — *Drudes Annalen*, juillet 1906.

Comme l'a montré l'auteur[1], l'étude de la répartition de l'énergie dans le spectre du manchon Auer et du rapport de sa radiation totale à celle d'un corps absolument noir de température connue conduit au résultat que la température maxima du manchon incandescent avec un brûleur Auer ordinaire à verre n'a pas besoin d'être supérieure à 1550-1600 si l'on suppose seulement une radiation de température. En admettant cette valeur de la température d'incandescence, on trouve que les pouvoirs émissifs du manchon sont inférieurs à l'unité pour toutes les longueurs d'onde du spectre étudié, de $\lambda = 0,45\mu$ à $\lambda = 18\mu$. Dans la région du spectre comprise entre 1 et 5μ, ils n'atteignent que des valeurs extrêmement faibles : au contraire, dans la région des ondes longues, ainsi que dans la région des ondes courtes du spectre visible, ils se rapprochent de l'unité. Pour des rayons de cette longueur d'ondes, par exemple pour la lumière bleue, le manchon Auer chaud doit donc être presque noir, si l'évaluation de la température est exacte. En fait, des expériences spéciales faites par l'auteur dans le bleu ont montré que le manchon possède un pouvoir émissif très élevé, ce qui vérifie l'exactitude de l'évaluation de température indiquée (1550 à 1600°).

L'auteur s'est proposé de déterminer de quelle façon le pouvoir émissif dans le bleu et la température du bec Auer dépendent de la teneur du manchon en cérium. Pour cela, il a employé, outre un manchon uniquement constitué d'oxyde de thorium, des manchons contenant 2,3 et 5 % d'oxyde de cérium, que l'on trouve en proportion variable dans les manchons du commerce. A froid, on ne peut pas distinguer ces différents manchons les uns des autres, mais, à quelques centaines de degrés, les manchons contenant de l'oxyde de cérium prennent un aspect gris verdâtre d'autant plus foncé que la teneur en cérium est plus élevée. Au voisinage de l'incandescence, cette coloration gris verdâtre se transforme en une couleur brun sombre.

Dans les expériences qui suivent, l'auteur s'est borné à comparer les pouvoirs de réflexion diffuse des manchons à chaud et à froid. La méthode employée était semblable à celle de Féry. Dans les expériences de ce physicien, la lumière d'une lampe à arc, concentrée par une lentille, était envoyée sur un manchon que l'on photographiait ainsi à chaud et à froid. Pour les manchons contenant de l'oxyde de cérium, l'impression obtenue sur la plaque quand on opérait à froid était infiniment plus forte que l'impression obtenue à chaud, malgré la lumière propre émanant du manchon dans ce cas. L'auteur a employé le dispositif suivant : il projetait sur le manchon une image extrêmement lumineuse du cratère d'une lampe à arc de 30 ampères dont les rayons calorifiques étaient arrêtés le plus possible par une couche d'eau que traversait le faisceau émis. L'éclat du point éclairé sur le manchon était observé, pour la lumière rouge et bleue, au moyen d'un pyromètre optique dans les trois cas suivants :

1° Le manchon éclairé étant froid,

2° Le manchon éclairé étant à l'incandescence normale,

3° Le manchon non éclairé étant à l'incandescence normale.

En appelant H_1, H_2 et H_3 les éclats observés dans ces trois cas, les pouvoirs de réflexion diffuse du manchon froid et chaud sont dans le rap-

[1] Voir *Éclairage Électrique*, tome XLVII, 21 avril 1906, page 105.

port de $H_1/(H_2 - H_3)$. Les expériences furent faites pour différents angles d'incidence. La série d'expériences rapportée par l'auteur est relative à un angle de 45°. Les résultats sont résumés par le tableau I, qui indique aussi les températures « noires » pour les points du manchon étudié dans le bleu et le rouge. On voit que, dans le rouge, le pouvoir de réflexion diffuse ne diffère pas beaucoup à chaud et à froid pour le manchon ne contenant pas d'oxyde de cérium, et diffère beaucoup pour les manchons contenant de l'oxyde de cérium. L'influence de la température sur le pouvoir de réflexion des manchons contenant du cérium est plus marquée dans le bleu.

TABLEAU I

COMPOSITION DES MANCHONS		0,00 Ce_2O_3 1,00 ThO_2	0,008 Ce_2O_3 0,992 ThO_2	0,02 Ce_2O_3 0,98 ThO_2	0,03 Ce_2O_3 0,97 ThO_2	0,05 Ce_2O_3 0,95 ThO_2
Température « noire ».	Rouge $\lambda = 0,65\ \mu$.	»	1 319°	1 303°	1 293°	1 285°
	Bleu $\lambda = 0,46\ \mu$.	»	1 524	1 460	1 420	1 375
Pouvoir de réflexion du manchon chaud divisé par le pouvoir de réflexion du manchon froid.	Rouge.	1,15	1,02	0,98	0,93	0,79
	Bleu	0,98	0,37	0,36	0,33	0,30
Pouvoir émissif (approximatif).	Rouge.	0,08	0,18	0,22	0,26	0,37
	Bleu	0,22	0,70	0,71	0,74	0,76
Température vraie.	Rouge.	»	1 556°	1 491°	1 457°	1 401°
	Bleu	»	1 561	1 503	1 448	1 399

Quand on emploie un verre pour activer le tirage, et que l'on règle bien les arrivées de gaz et d'air, on obtient des valeurs de la température « noire » de 20° a 30° plus élevées. L'accroissement de la température vraie est évidemment un peu plus faible.

Des températures « noires » indiquées, on déduit que l'action du deuxième manchon est sensiblement plus intense dans le rouge que celle des manchons contenant plus d'oxyde de cérium et un peu plus intense dans le bleu. On ne doit cependant pas en conclure qu'une teneur en oxyde de cérium supérieure à 0,8 °/₀ soit défavorable dans toutes les circonstances au point de vue de l'émission lumineuse, car, outre la teneur en cérium, la finesse du tissu et l'épaisseur des fils influent sur le pouvoir émissif. Pour différents tissus, les meilleurs résultats sont obtenus sans doute pour différentes teneurs en oxyde de cérium. Probablement, plus les fils sont fins et plus la teneur en cérium doit être élevée pour que l'on obtienne le même pouvoir émissif.

R. V.

GÉNÉRATION ET TRANSFORMATION

Nouvelle turbine à vapeur radiale à action. — **Kolb.** — *Elektrotechnik und Maschinenbau.*

L'auteur a inventé une turbine qui réalise un perfectionnement de la turbine à vapeur Elektra, dans laquelle la vapeur est ramenée plusieurs fois sur une seule et même roue mobile afin de diminuer la vitesse de rotation. Le perfectionnement réside principalement dans la forme particulière du récepteur entre les deux roues à haute et basse pression. Ce récepteur forme une partie fixe dans la carcasse de la turbine et est constitué par une chambre fermée, munie d'ouvertures d'entrée et de sortie, entre les deux faces intérieures des roues à haute et basse pression. La carcasse comprend le conduit d'amenée et le conduit de sortie de la vapeur. Les tuyères d'admission à haute pression sont rapportées sur la carcasse ; les tuyères à basse pression forment une seule pièce avec le récepteur. A mesure que la vitesse décroît, la section des conduits augmente. Au lieu de deux roues, on peut en employer plusieurs et constituer une turbine

étagée, ce qui permet de diminuer la vitesse périphérique. Les roues tournantes sont formées chacune d'un disque portant à sa périphérie des aubes rapportées. Le disque est en fer forgé ou bien en acier : les aubes rapportées sont en acier.

La nouvelle turbine possède l'avantage d'avoir une faible vitesse de rotation et de présenter à l'intérieur une pression uniforme.

B. L.

***Sur les courants parasites.* — M. B. Field.** — *Institution of Electrical Engineers, Electrical Review.*

Le terme de « courant parasite » est employé par l'auteur pour définir l'ensemble de tous les courants qui ne produisent pas de travail utile et qui absorbent de l'énergie pour couvrir les pertes Joule C^2R.

La caractéristique de toute forme de courant parasite dont il s'agit est que ce courant, qui constitue une partie du courant total passant dans le circuit, peut être considéré conventionnellement comme entièrement séparé du courant utile et superposé à celui-ci. Pour mettre cette caractéristique en évidence, l'auteur considère le cas d'un système à courant alternatif où le facteur de puissance est inférieur à l'unité. Soit C_1 l'amplitude de la composante utile, C_2 celle de la composante parasite du courant. L'ampèremètre principal indique $\sqrt{(C_1^2+C_2^2)/2}$. Si ce courant passe dans un conducteur de résistance r ohms, la valeur moyenne des pertes ohmiques est $(C_1^2+C_2^2)r/2$. On considère la composante utile et la composante parasite comme deux entités séparées, et l'on obtient pour les pertes ohmiques dues à chacune d'elles $C_1^2r/2$ et $C_2^2r/2$; la somme de ces pertes est identique à la perte moyenne due au courant total qui passe.

Il faut remarquer que ce n'est pas généralement vrai pour une subdivision arbitraire quelconque du courant en parties composantes : par exemple, un courant de dix ampères passant dans un conducteur de un ohm de résistance produit une perte ohmique de 100 watts. Magnétiquement, ce courant est équivalent à un courant de quinze ampères passant dans une direction et à un courant superposé de cinq ampères passant en sens opposé. La somme totale des pertes Joule de ces composantes est, cependant, $225+25=250$ watts. Il est donc évident que l'on ne peut pas décomposer arbitrairement un courant en composantes quelconques et traiter celles-ci à tous points de vue comme des entités séparées ; au contraire, on peut toujours traiter les composantes utile et parasite comme si elles existaient indépendamment l'une de l'autre.

Cette conception très simple est d'un grand secours dans l'étude d'un certain nombre de problèmes ; par exemple, une certaine distribution de courant dans un système de conducteurs peut être très complexe si on la considère dans son ensemble et peut, au contraire, être équivalente à une distribution « naturelle » superposée à un courant parasite : si l'on peut isoler la cause qui produit ce courant parasite, on peut déterminer sa valeur et arriver ainsi à la caractéristique de la distribution complexe résultante.

Après avoir rapidement examiné les courants parasites dus à la forme d'ondes, le facteur de puissance et les courants principaux, l'auteur étudie les « courants parasites internes ».

Ceux-ci peuvent être classés d'abord en deux catégories :

a) Ceux dont l'amplitude est déterminée par le degré d'excitation et qui dépendent très peu de la charge ;

b) Ceux dont l'amplitude est déterminée par la charge et qui dépendent très peu de l'excitation de la machine.

Tous deux produisent une modification de la densité du courant nominal dans les conducteurs de la machine et augmentant les pertes d'une façon correspondante.

Les courants parasites de la première catégorie peuvent être considérés comme ajoutant une perte constante définie (pour une excitation donnée) : ceux de la seconde catégorie produisent une perte supplémentaire proportionnelle au carré du courant de travail, perte dont on peut tenir compte en supposant simplement un accroissement virtuel de la résistance du circuit. On se rendra mieux compte plus loin de la signification exacte de ce fait, mais on peut immédiatement citer comme exemple ce que l'on a appelé l'effet superficiel (skin effect) présenté par un conducteur massif traversé par un courant alternatif : cet effet est dû réellement à un courant parasite proportionnel au courant de travail, et les pertes totales dues au courant parasite et au courant de travail peuvent être déterminées si l'on suppose simplement que la résistance du conducteur a augmenté. De même, les pertes supplémentaires dans l'enveloppe et dans l'âme des

câbles sont proportionnelles au courant de travail, et les pertes totales peuvent être évaluées simplement si l'on suppose un accroissement de résistance des conducteurs. Le coefficient par lequel la résistance actuelle doit être multipliée pour tenir compte des pertes additionnelles dépend de la fréquence, de la résistance spécifique et des dimensions du conducteur.

Les générateurs d'une certaine puissance présentent généralement deux ou plusieurs circuits induits, et une distribution inégale du courant dans les différents circuits est équivalente à une distribution uniforme (ou naturelle) superposée à un système de courants parasites. De même, chaque circuit peut être composé de deux ou plusieurs conducteurs, rubans ou barres en parallèle, et une distribution inégale entre ces conducteurs est équivalente à une distribution naturelle, avec des courants parasites en plus. Finalement, la distribution de la densité de courant dans chaque barre individuelle peut n'être pas uniforme, et l'on a encore affaire à un courant parasite superposé à une distribution naturelle.

Il arrive quelquefois qu'une classe particulière de courants parasites domine d'une façon tout à fait inattendue et que l'on obtient une machine meilleure, plus économique et ayant un meilleur rendement en diminuant le poids de cuivre employé pour sa construction. On peut citer comme exemple le type d'alternateur avec induit en disque plat sans fer. L'induit consiste en bandes de cuivre formant des bobines plates. Chaque bande est le siège d'un courant parasite induit lorsqu'elle passe dans le champ magnétique produit par deux pôles placés vis-à-vis l'un de l'autre. Pour calculer les pertes, on peut appliquer la formule des courants de Foucault employée pour les tôles d'induits :

Pertes en watts par centimètre cube

$$=(f^2 . B^2 . t^2)/(6 . 10^{15} . \rho),$$

dans laquelle t désigne l'épaisseur en centimètres, f la fréquence en périodes par seconde, B l'induction dans l'entrefer, ρ la résistance spécifique en ohms par centimètres.

Si l'on fixe à 310 ampères par centimètre carré la densité maxima nominale, les pertes nominales C^2R sont de 0,18 watts par centimètre cube à environ 45 degrés centigrades.

En appliquant la formule ci-dessus, on a, pour $f=50$, $B=5000$, $\rho=1,910^{-16}$, les résultats suivants :

$t=0,1$ cm.	Pertes par cm³ $=0,0548$
0,2	$=0,22$
0,3	$=0,493$.

Donc, avec un induit bobiné avec une bande de 2 millimètres d'épaisseur, les pertes supplémentaires dues à la modification de la densité de courant dans la partie active de l'induit sont plus grande que les pertes normales C^2R. Cet état de choses existe dans un grand nombre de machines actuellement en service. Le résultat obtenu par l'emploi de bandes moins épaisses est de réduire l'échauffement et d'augmenter le rendement, tout en allégeant la machine et en diminuant son prix de revient. Pour la même raison, il est évident qu'une augmentation de la résistance spécifique produira une diminution des pertes totales, et l'on arrive à la conclusion paradoxale que le rendement s'améliore quand la température augmente.

L'attention de l'auteur a été attirée par une étude intéressante du Dr S. Ottenstein, publiée en 1903, sur le flux dans les encoches d'induits dentés et les pertes par courants de Foucault dans les conducteurs massifs de l'induit. Cet expérimentateur indiquait les résultats d'essais effectués pour déterminer la valeur de ces courants de Foucault dus à la composante radiale et tangentielle du flux dans l'encoche. Les induits étudiés avaient un diamètre de 225 millimètres, et les encoches avaient les dimensions suivantes : $7\times22,5$; 7×35 ; $9\times35,5$; 7×23 ; $8,5\times23$; $14\times11,75$; la première dimension indiquant la largeur de l'encoche et la seconde la profondeur en millimètres.

Dans les différentes expériences, l'induction théorique dans les dents était comprise entre 18000 et 31000, et les pertes par courants de Foucault dans les différents conducteurs massifs employés ont été trouvées équivalentes aux pertes qu'occasionnerait une densité de courant de 64 à 750 ampères par centimètres carrés dans la portion active, suivant la dimension et la position du conducteur, les dimensions des encoches, l'entrefer et la nature de la surface polaire. La fréquence dans ces expériences était de 33,3 périodes par seconde.

Les deux exemples précités se rapportent à des cas où la valeur des pertes dépend de la va-

leur de l'excitation et non de la charge de la machine. L'exemple suivant se rapporte à l'autre cas, dans lequel les pertes dépendent du courant de charge et non de la valeur de l'excitation.

La figure 1 représente un conducteur massif en cuivre d'une hauteur de b centimètres et d'une épaisseur de d centimètres placé dans une encoche d'un induit feuilleté. Un courant alternatif traverse le conducteur dans une direction perpendiculaire au plan de la figure, le plan des tôles de l'induit correspondant au plan de la figure. Le courant passe par couches, la densité étant plus grande dans les couches extérieures au sommet de l'encoche, et plus faible dans les couches inférieures au fond de l'encoche. Pour cette raison, l'auteur applique à cet effet le nom d' « effet lamellaire ». Cet effet est évidemment étroitement lié à l'effet superficiel dans un conducteur circulaire où les courants parasites passent dans une direction le long des portions périphériques et dans la direction opposée le long des portions centrales.

Fig. 1.

L'effet d'un courant traversant le conducteur massif de la figure 1 est de produire un flux magnétisant à travers l'encoche de paroi à paroi. Si la longueur de l'encoche est faible en comparaison de sa profondeur, les lignes de force sont presque exactement rectilignes de paroi à paroi, excepté à proximité du haut de l'encoche.

Si *efgh* est une ligne de force, on sait que la force magnétique totale (ou l'intégrale linéaire) prise le long du circuit fermé est $4\pi/10$ fois le courant total en ampères dans cette portion du conducteur. La réluctance magnétique de la portion du fer du circuit, c'est-à-dire de e à h, à g, à f est négligeable en comparaison de la portion d'air de f à e : l'intégrale linéaire de la force magnétique de f à e est donc égale à $4\pi/10$ fois le courant en ampères passant dans le conducteur entre les limites $x=0$ et $x=x_1$. L'induction en haut de l'encoche est donc $(4\pi/10)(C/\alpha)$, en appelant C le courant total passant dans le conducteur, et l'induction au fond de l'encoche est nulle. Si, alors, on suppose que l'induction croît uniformément de zéro en bas du conducteur à $4\pi C/10\alpha$ en haut du conducteur, le flux total traversant celui-ci est $(4\pi/10)(C/\alpha)(b/2)$ par centimètre de longueur.

Si l'on considère une tôle très mince le long du bord supérieur du conducteur formant, en combinaison avec une tôle mince semblable placée le long du bord inférieur, une boucle que traverse le flux total, la force électromotrice induite dans cette boucle par centimètre de longueur est $(4\pi^2/10)(bfC/\alpha)10^{-8}$ volts, f étant la fréquence. Cette expression donne la valeur de la racine carrée moyenne des volts, si C représente la racine carrée moyenne du courant. Si le conducteur est long en comparaison de sa section droite, une telle force électromotrice tend à produire un courant parasite passant dans la boucle et de valeur $(2\pi^2/10)(bfC/\alpha\rho)10^{-8}$, en appelant ρ la résistance en ohms par centimètre.

Comme exemple, on peut prendre $f=50$; $b=5$ centimètres ; $d/a=0{,}7$; $\rho=1{,}9.10^{-6}$ (à 45°) : la valeur du courant parasite est environ $2{,}6\ C/\alpha$; la densité du courant nominal est $C/5d$; la densité du courant parasite dans les couches extrêmes est donc égale à plus de 9 fois la densité de courant nominale, et la densité de pertes, ou pertes par centimètre cube au bord extrême, due au courant parasite, est égale à plus de quatre-vingt fois celle qui correspond à la densité du courant nominal.

Cet exemple est cité pour montrer que quelques phénomènes en jeu dans les conducteurs massifs méritent d'être étudiés avec attention. L'hypothèse faite que la distribution du flux est celle donnée par une densité de courant uniforme est évidemment fausse, comme le montre le calcul, et la distribution réelle est telle qu'elle tende à réduire l'effet des courants parasites. Cependant, quoique le résultat soit considérablement exagéré par suite de cette hypothèse, on peut affirmer que certaines machines actuelles présentent, dans le bord supérieur du conducteur, une densité de pertes supérieure à 30 fois celle qui correspond à la densité de courant normale.

(A suivre.) B. L.

Enroulements série-parallèle à connexions équipotentielles *(fin)*(¹). — **Arnold.** — *Electrotechnische Zeitschrift*, 5 juillet 1906.

Conditions de symétrie et erreur de pas d'un induit denté à connexions équipotentielles.

(¹) Voir *Éclairage Electrique*, tome XLVIII, 11 août 1906, page 234.

Si l'on résume brièvement les conditions de symétrie indiquées, on trouve que la condition primordiale est que K/a soit un nombre entier. Pour les enroulements où p/a est aussi un nombre entier, il faut, en outre, que Z/a soit un nombre entier.

Pour les enroulements où a/p est un nombre entier, il suffit que Z/p soit un nombre entier.

Seuls les enroulements avec p/a ou a/p entier, pour lesquels ces conditions sont remplies, sont entièrement symétriques. Pour les autres enroulements, il est intéressant de prendre Z/a (ou Z/p, quand $a > p$) entier.

Dans tous les enroulements il faut, quand cela est possible, ne choisir que des proportions pour lesquelles il est possible, sans artifices auxiliaires, de rendre Z/a égal à un nombre entier.

Dès qu'il y a une erreur dans les pas de potentiel, il faut examiner si celle-ci ne dépasse pas la limite admissible.

Erreur de pas. — Quand on place les côtés des bobines dans des encoches, ceux-ci sont décalés par rapport à la position qu'ils occuperaient dans un enroulement uniformément réparti. Pour ce dernier enroulement, dans lequel toutes les distances entre conducteurs sont égales, les erreurs peuvent être facilement exprimées par une formule. Pour un induit denté, la position des conducteurs les uns par rapport aux autres est si variée que, pour la détermination de l'erreur, le plus simple est de tracer la position des conducteurs dans les encoches et la position des conducteurs correspondants dans un enroulement uniformément réparti. On calcule alors l'erreur pour l'enroulement uniformément réparti, et l'on détermine de combien un conducteur est décalé, quand on le place dans une encoche, par rapport à sa position dans l'enroulement uniformément réparti.

L'auteur détermine, en prenant comme exemple la figure 1, de combien un côté de bobine est décalé, par suite du placement dans une encoche, par rapport à sa position dans un enroulement uniformément réparti. La figure 1 représente deux encoches et les jonctions schématiques des conducteurs supérieurs avec le collecteur. La distance des deux conducteurs voisins d'une encoche est désignée par r_s ou, si l'on mesure en pas des lames, par r_β. On peut écrire :

$$t_1/r_s = \frac{u_n}{2}\Big/ r_\beta \text{ pas des lames.}$$

ou

$$r_\beta = \frac{r_s u_n}{2t_1} \text{ pas des lames.}$$

Si l'on se représente l'enroulement uniformément réparti sur la périphérie, la distance des deux conducteurs voisins est égale au pas des lames.

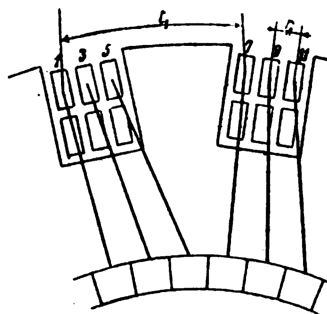


Fig. 1.

Si l'on suppose que les cotés des bobines 1 et 7 conservent à la périphérie de l'induit la position, qu'ils avaient dans un enroulement uniformément réparti, et que les autres côtés des bobines sont décalés par rapport à la position qu'ils avaient dans ce cas, les côtés de bobines 3 et 9 sont décalés de

$$1 - \frac{r_s u_n}{2t_1}$$

et les côtés 5 et 11 sont décalés de

$$2\left(1 - \frac{r_s u_n}{2t_1}\right).$$

par rapport à la position qu'ils auraient dans un enroulement uniformément réparti.

Dans les enroulements en série-parallèle avec p/a et Z/a entier, ou avec a/p et Z/p entier, l'erreur de pas est $\alpha_x = 0$.

Dans tous les autres enroulements série-parallèle, il se produit toujours des erreurs. Le calcul de l'erreur de pas α_n dans ces enroulements, pour lesquels p/a ou a/p ou Z/a n'est pas un nombre entier, est indiqué par l'auteur sur des exemples.

Premier exemple. — $a < p$; Z/a entier.

Le calcul d'une machine a donné comme meilleures proportions d'enroulement $p = 6$; $a = 4$; $u_n = 4$. — $K = 404$ environ. D'après le tableau précédemment donné, on voit que, pour les conditions $p = 6$, $a = 4$ et $u_n = 4$, la condition Z/a entier peut être satisfaite. On prend donc

$$K = 400; \qquad Z = 200.$$

Le pas du collecteur est alors le suivant :

$$y_k = \frac{400 - 6}{6} = 66.$$

Les valeurs de y_k, a et k ayant 2 comme plus grand commun diviseur, l'enroulement est doublement fermé.

Pour le calcul des pas équipotentiels, on emploie la formule indiquée précédemment pour y_p. Cette formule est :

$$y_p = x \cdot y_k \pm 1.$$

Pour le calcul de l'erreur de pas, on emploie la formule :

$$\alpha_2 = \pm \left(1 - x\frac{a}{p}\right).$$

Le nombre des jonctions à un système étant $a = 4$, on doit avoir

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = p = 6.$$

On obtient ainsi les chiffres indiqués par le tableau suivant :

$x_1 = 1$	$y_{p1} = 1 . 66 + 1 = 67$	$\alpha_{x1} = 1 - 1 \cdot \frac{4}{6} = \frac{1}{3}$
$x_2 = 2$	$y_{p2} = 2 . 66 + 1 = 133$	$\alpha_{x2} = 1 - 2 \cdot \frac{4}{6} = -\frac{1}{3}$
$x_3 = 1$	$y_{p1} = 1 . 66 + 1 = 67$	$\alpha_{x3} = 1 - 1 \cdot \frac{4}{6} = \frac{1}{3}$
$x_4 = 2$	$y_{p2} = 2 . 66 + 1 = 133$	$\alpha_{x4} = 1 - 2 \cdot \frac{4}{6} = -\frac{1}{3}$
$\Sigma x = 6$	$\Sigma y_p = K = 400$	$\Sigma \alpha_x = 0$

La lame 1 est reliée aux lames $1 + 67 = 68$; $68 + 133 = 201$; $201 + 67 = 268$. Les lames 1, 68, 201 et 268 sont respectivement reliées aux côtés de bobines 1, 135, 401, 535. Sur la figure 2*a*, les côtés des bobines sont représentés dans la position qu'ils occupent dans l'encoche. Sur la figure 2*b*, les côtés des bobines sont représentés dans la position qu'ils occupent dans un enroulement uniformément réparti sur la périphérie de l'induit. On a $K/p = 400/6 = 66,66$, et $2K/p = 133,33$. Les pas y_{p1} et y_{p3} sont donc trop grands de 1/3 de lame, tandis que les pas y_{p2} et y_{p4} sont trop petits de 1/3 de lame. Dans la figure 2*c*, les côtés de bobines sont représentés dans une position pour laquelle leurs potentiels sont égaux et pour laquelle il n'y a pas d'erreur. Comme on l'a indiqué plus haut, la distance de deux conducteurs dans l'encoche est égale à $\frac{r_1 u_n}{2t_1}$ pas des lames, et l'on peut déterminer le décalage de chaque côté de bobine par rapport à la position d'égalité de potentiel. Supposons $r_1 u_n/2t_1 = 0,4$: l'erreur, pour les côtés de bobines 135 et 535, est égale à

$$\alpha_n = 1 - (1/3) - 0,4 = 0,27 \times \text{pas des lames}$$

$$\text{ou } \alpha_n{}^\circ = a\frac{360}{k}\alpha_n = 4 \cdot \frac{360}{400} \cdot 0,27 = 0,97°.$$

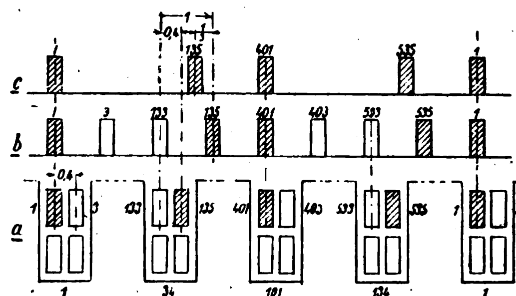


Fig. 2.

Comme on le verra plus loin, une erreur de cette grandeur est parfaitement admissible.

Si l'on relie les lames 2, 69, 202 et 269 en un système, les côtés de bobines reliés à ces lames sont respectivement les côtés 5, 137, 403, 537. Dans ce cas, en traçant la figure correspondant à la figure 2, on voit que l'erreur pour les côtés 137 et 537 est

$$\alpha_n = 1 + (1/3) - 0,4 = 0,93$$

$$\text{ou} \quad \alpha_n{}^\circ = a\frac{360}{k}\alpha_n = 4\frac{360}{400}0,93 = 3,35°.$$

Cette erreur atteint la limite admissible.

On voit que l'on obtient la plus petite erreur de 0,97° en partant d'un côté de bobine en haut à gauche et en débutant avec le plus petit pas ($2y_{p1} = 134$). Il y a lieu de remarquer, en outre, que a et p ont pour plus grand commun diviseur 2 et, comme Z est divisible par 2, deux points d'un système ont un potentiel exactement égal. Dans la figure 2, les côtés 1 et 401 ont le même potentiel.

2° exemple. — a/p entier ; Z/p entier.

On prend $a = 6$; $p = 3$; $K = 48$; $u_n = 4$; $Z = 24$.

Le pas du collecteur est alors donné par l'équation :

$$y_k = \frac{k \pm a}{p} = \frac{48 - 6}{3} = 14.$$

K, a et y_k ayant comme plus grand commun

diviseur 2, l'enroulement est doublement fermé. On a :

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 = 3$$
$$x_1 = x_3 = x_5 = 1$$
$$x_2 = x_4 = x_6 = 0$$
$$y_{p1} = y_{p3} = y_{p5} = 1.14 + 1\,(6/3) = 16$$
$$y_{p2} = y_{4p} = y_{p6} = 0.$$

Les lames reliées par un système de connexions équipotentielles, par exemple 1 — 17 — 33 ou les conducteurs 1 ; $1 + 2y_p = 33$; $33 + 2y_p = 65$ appartiennent au même enroulement. Les conducteurs sont distants de 8 encoches et ont dans le champ une position exactement symétrique : on a donc $\alpha_n = 0$.

On réalise les pas $y_{p2} = y_{p4} = y_{p6} = 0$ en reliant ensemble les conducteurs placés dans la même encoche.

Le pas $y_p = 0$ entraîne l'erreur suivante :

$$\alpha_n = \frac{r_s u_n}{2t_1}$$

entre les deux conducteurs voisins d'une encoche. Pour $r_s u_n/2t_1 = 0{,}4$, on a :

$$\alpha_n{}^\circ = p\,\frac{360}{k}\,\alpha_n = 3\,\frac{360}{48}\,0{,}4 = 9^\circ.$$

Cette erreur est beaucoup trop importante : il n'est donc pas possible, dans ce cas, de relier ensemble des conducteurs voisins.

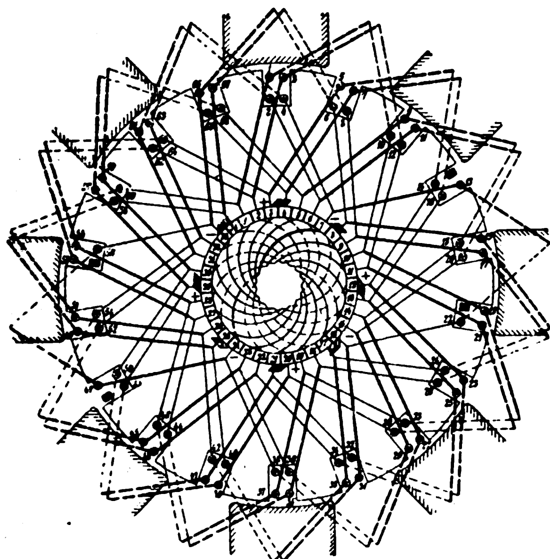


Fig. 3.

3e exemple (fig. 3). — On choisit les constantes d'enroulement suivantes : $p = 4$; $a = 2$; $u_n = 4$. Le tableau montre que, pour cet enroulement, la condition Z/a entier ne peut être satisfaite sans artifice auxiliaire. On peut cependant satisfaire à cette condition pour cet enroulement, en ajoutant $2a = 4$ côtés de bobines inactifs. On choisit $s = 68$ et $k = 34$. Le nombre total des côtés de bobines, y compris les côtés inactifs est alors $2{,}34 + 4 = 72$: le nombre d'encoches est $72/4 = 18$. On a $Z/a = 18/2 =$ nombre entier. La position des conducteurs inactifs est choisie de façon que ceux-ci soient répartis symétriquement sur la périphérie de l'induit.

Tous les côtés des bobines correspondants des deux groupes sont dans le même champ. L'enroulement est devenu tout à fait symétrique.

Comparaison des valeurs de $\alpha_n{}^\circ$ relatives à quelques machines construites. — Le tableau suivant indique les valeurs de l'erreur $\alpha_n{}^\circ$ pour différentes machines construites avec enroulement série-parallèle. Les machines 14 et 15, avec une erreur de pas de 4,4 ou 5,1°, présentent en fonctionnement des courants intérieurs intenses. Les pertes en watts dues à ces courants supplémentaires se sont élevées à 80 % des pertes totales dans le fer. La commutation est bonne.

La dernière machine (n° 16) a dû être reconstruite, à cause de l'échauffement anormal que produisaient les courants de circulation intérieurs. L'erreur est, pour cette machine, de 7,1°.

Dans les colonnes p/a et Z/a, on a introduit les notations : nE qui indique que p/a ou Z/a est un nombre entier et pnE qui indique que p/a ou Z/a n'est pas un nombre entier.

Nombre de connexions équipotentielles.

Il n'est pas nécessaire que toutes les lames soient reliées à des connexions équipotentielles quoique, au point de vue de l'égalisation des courants de court-circuit, il soit bon d'avoir le plus de connexions possible. Pour la plupart des cas, on obtient une égalisation suffisante en reliant seulement le tiers, le quart, le cinquième ou le dixième des lames.

Dans les enroulements série-parallèle, on parcourt à chaque tour p bobines dont les côtés se répartissent sur tous les pôles de telle façon qu'il y ait un côté sous chaque pôle : sur le pourtour du collecteur on progresse de a pas des lames. Donc, même quand les flux produits par les différents pôles sont inégaux, la même

TABLEAU INDIQUANT LES VALEURS DE L'ERREUR DE PAS α_{n^o} DANS DES MACHINES CONSTRUITES AVEC ENROULEMENTS SÉRIE-PARALLÈLE

N°	p	a	K	Z	u_n	$\frac{p}{a}$	$\frac{Z}{a}$	$\frac{r_2 u_n}{2 . t_1}$	ERREUR DE PAS a_n max	ERREUR DE PAS a_{n^o} max	REMARQUES
1	6	3	609	203	6	$n.E$	$p.n.E$	0,4	1,2	2,13	
2	6	2	490	245	4	$n.E$	$p.n.E$	0,35	0,65	0,95	
3	6	3	651	217	6	$n.E$	$p.n.E$	0,4	1,2	2,0	
4	5	2	303	303	2	$p.n.E$	$p.n.E$	»	0,2	0,48	
5	5	3	412	412	2	$p.n.E$	$p.n.E$	»	0,4	1,05	
6	3	2	236	118	4	$p.n.E$	$n.E$	0,5	0,83	2,55	
7	3	3	285	95	6	$n.E$	$p.n.E$	0,3	1,4	5,3	Sensible.
8	4	2	366	183	4	$n.E$	$p.n.E$	0,3	0,7	1,38	
9	6	3	795	265	6	$n.E$	$p.n.E$	0,3	1,4	1,9	
10	4	2	238	119	4	$n.E$	$p.n.E$	0,55	0,45	1,35	
11	4	2	422	141	6	$n.E$	$p.n.E$	0,5	1,0	1,7	Un conducteur inactif dans 2 encoches.
12	4	2	342	171	4	$n.E$	$p.n.E$	0,4	0,6	1,26	
13	6	2	776	259	6	$n.E$	$p.n.E$	0,5	1,0	0,95	—
14	2	2	164	55	6	$n.E$	$p.n.E$	0,5	1,0	4,4	—
15	2	2	140	47	6	$n.E$	$p.n.E$	0,5	1,0	5,1	—
16	3	3	213	71	6	$n.E$	$p.n.E$	0,3	1,4	7,1	A dû être reconstruite.

force électromotrice est induite dans chaque groupe de p bobines. Si nous relions ces groupes entre eux par des connexions équipotentielles, en reliant à chaque fois la a^e lame du collecteur à une connexion équipotentielle, il ne peut se produire, par suite de l'inégalité des pôles, aucun courant de circulation intérieur : la présence des connexions équipotentielles exerce l'action la plus favorable sur la commutation.

Si l'on trace le schéma d'un enroulement ondulé pour $p = 3$, $a = 3$, $y_k = 11$, $K = 3.11 - 30$; $y_{p1} = y_{p2} = y_{p3} = 1.11 - 1 = 10$, en partant de la lame 1 on atteint, au bout d'un tour, la lame $1 + a = 4$, et, au bout d'un second tour, la lame $4 + a = 7$. Dans la boucle formée par les connexions équipotentielles

$$1 - 12 - 23 - 4 - 24 - 13 - 2 - 21 - 1,$$

il y a p contre p bobines connectées ensemble, dont les forces électromotrices se compensent quand les flux des différents pôles sont inégaux. C'est là un avantage important de l'enroulement ondulé par rapport à l'enroulement imbriqué. Si l'on ne reliait pas ensemble les a^e lames (1 — 11 ; 4 — 14), mais toutes les lames (1 — 11 ; 2 — 12), les bobines 1 — 12 par exemple (6 volts) et 21 — 2 (11 volts) se trouveraient connectées en opposition, et il y aurait des courants de circulation. Dans des enroulements imbriqués, une telle compensation n'est pas possible. Au point de vue de l'équilibrage de l'induit il est bon, dans les turbo-dynamos par exemple, de compenser les attractions magnétiques inégales exercées par les pôles. Dans ce cas, on place un nombre de connexions équipotentielles telles que les flux différents soient compensés par des courants de circulation.

B. L.

OSCILLATIONS HERTZIENNES & TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

Note sur la théorie des oscillateurs dissymétriques. — **J.-A. Fleming.** — *The Electrician*, 6 juillet 1906.

L'emploi en télégraphie sans fil d'antennes ou de fils radiateurs présentant une partie horizontale et une partie verticale et possédant la propriété de radier inégalement dans différentes directions horizontales, attire l'attention sur les propriétés particulières des oscillateurs électriques employés comme radiateurs ou transmetteurs. L'objet de la note de l'auteur est de montrer que les propriétés de tels radiateurs peuvent être déduites des principes connus et que les faits expérimentaux sont en concordance avec la théorie.

La nature du champ de force électrique et magnétique autour d'un court oscillateur recti-

ligne a été analysée et étudiée par un grand nombre de physiciens. Dans ces cas, on avait une symétrie parfaite de la radiation tout autour de l'axe de l'oscillateur.

Cette égalité est détruite quand on ploie l'oscillateur, et celui-ci radie alors inégalement dans différentes directions prises dans le plan équatorial de l'oscillateur : la radiation est plus grande ou plus forte du côté convexe de l'oscillateur.

L'étude analytique de ce phénomène présente des difficultés énormes à moins qu'on ne limite ses considérations au cas où le courant dans l'oscillateur est supposé avoir la même valeur en tous les points au même instant, et aussi où les dimensions de l'oscillateur sont petites en comparaison de la distance de celui-ci aux points auxquels on étudie le champ.

Une forme d'oscillateur du type précédent peut être considérée comme la superposition de trois oscillateurs de Hertz (fig. 1) placés perpendiculairement les uns aux autres, les pôles

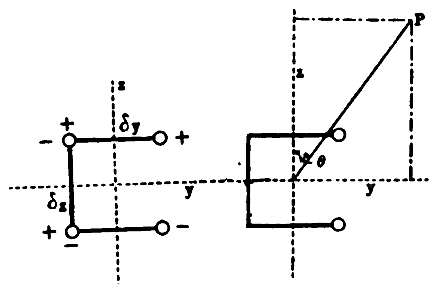


Fig. 1. Fig. 2.

étant disposés de telle façon que, aux deux sommets, les pôles superposés soient de signes contraires : les oscillations sont supposées synchrones et semblablement dirigées. Pour déterminer le champ de l'oscillateur coudé, il suffit de calculer les composantes et de les additionner. Soit un oscillateur simple placé au centre à l'origine et dont l'axe coïncide avec l'axe des z. Soit $2\pi/n$ la période des oscillations dans cet oscillateur et $2\pi/m$ la longueur d'ondes de la radiation émise. Soit δz la longueur de l'oscillateur, q la charge électrique à l'un ou l'autre pôle à un instant quelconque, i le courant uniforme dans l'axe, Q et I les valeurs maxima de q et i qui varient de telle façon que l'on ait

$$q = Q \sin nt; \qquad i = I \cos nt.$$

Soit $\Phi = Q\delta z$ le moment électrique maximum de l'oscillateur. On a $I = Qn$ ou $\Phi n = I\delta z$ et $n/m = v$, vitesse de propagation de la radiation dans l'espace. Le potentiel scalaire V en un point quelconque P, dont la distance à l'origine est r, est donné par l'expression :

$$V = -\frac{\Phi}{k}\frac{d}{dz}\left(\frac{\sin(mr - nt)}{r}\right) \qquad (1)$$

en appelant k la constante diélectrique du milieu et $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$.

Si F, G et H sont les composantes du potentiel vectoriel en P, on a $F = G = 0$ et :

$$H = -I\delta z \frac{\cos(mr - nt)}{r}. \qquad (2)$$

Si l'on emploie le symbole Π pour représenter $\sin(mr - nt)/r$, on peut écrire les expressions (1) et (2) sous la forme :

$$V = -\frac{\Phi}{k}\frac{d\Pi}{dz}; \qquad H = \Phi\frac{d\Pi}{dt}. \qquad (3)$$

Si l'on suppose que l'excitateur simple se déplace parallèlement à lui-même dans la direction négative de telle façon que son centre se déplace à une distance $-1/2(\delta y)$, les potentiels scalaire et vectoriel en P deviennent

$$V = \left(-\frac{\Phi}{k}\frac{d\Pi}{dz}\right) + \frac{1}{2}\frac{d}{dy}\left(\frac{\Phi}{k}\frac{d\Pi}{dz}\right)\delta y \qquad (4)$$

$$H = \Phi\frac{d\Pi}{dt} - \frac{1}{2}\frac{d}{dy}\left(\Phi\frac{d\Pi}{dt}\right)\delta y. \qquad (5)$$

Si l'on considère deux oscillateurs semblables de longueur δy et de moment maximum Φ' placés avec leurs pôles en directions opposées et avec leurs axes parallèles à l'axe de y, ces oscillateurs ayant leur centre à des distances $1/2(\delta z)$ et $-1/2(\delta z)$ de l'origine et leurs pôles disposés comme l'indique la figure 1. Les potentiels scalaire et vectoriel au point P de ces deux dernières oscillations sont donnés par les formules :

$$V = -\frac{\Phi'}{k}\frac{d^2\Pi}{dz\,dy}\delta z \qquad (6)$$

$$G = \Phi'\frac{d^2\Pi}{dz\,dt}\delta z. \qquad (7)$$

Si les trois oscillateurs courts et rectilignes, et possédant des courants égaux et des charges égales, sont placés autour de l'origine de façon à former un oscillateur doublement coudé, les potentiels scalaire et vectoriel de cet oscillateur au point P (fig. 2), dont la distance à l'origine est grande en comparaison des dimensions de l'oscillateur, sont donnés par les formules :

$$V = -\frac{\Phi}{k}\frac{d\Pi}{dz} + \frac{1}{2}\frac{\Phi}{k}\frac{d^2\Pi}{dydz}\delta y - \frac{\Phi'}{k}\frac{d^2\Pi}{dzdy}\delta z. \quad (8)$$

$$\left.\begin{aligned} F &= 0 \\ G' &= \Phi'\frac{d^2\Pi}{dzdt}\delta z \\ H &= \Phi\frac{d\Pi}{dt} - \frac{1}{2}\Phi\frac{d^2\Pi}{dydt}\delta y \end{aligned}\right\} \quad (9)$$

où $\Phi'\delta z = \Phi\delta y$.

Les forces électriques et magnétiques au point P, dont les composantes axiales sont P, Q et R et $a\,b\,c$ peuvent être tirées des équations (8) et (9) au moyen des relations

$$\left.\begin{aligned} P &= -\frac{dF}{dt} - \frac{dV}{dz}; \quad a = \frac{dH}{dy} - \frac{dG}{dz} \\ Q &= -\frac{dG}{dt} - \frac{dV}{dy}; \quad b = \frac{dF}{dz} - \frac{dH}{dx} \\ R &= -\frac{dH}{dt} - \frac{dV}{dz}; \quad c = \frac{dG}{dx} - \frac{dF}{dy}. \end{aligned}\right\} \quad (10)$$

Il est évident que, si le circuit électrique est complété par une paire d'oscillateurs doubles de moments Φ et Φ' placés perpendiculairement à chacun des autres avec les pôles dirigés dans le même sens tout autour de l'origine, on a un circuit fermé de surface $\delta y\delta z$ traversé par un courant maximum I. Ce quadruple oscillateur crée des potentiels tels que

$$\left.\begin{aligned} &V = 0; \quad F = 0 \\ &G = \Phi'\frac{d^2\Pi}{dzdt}\delta z; \quad H = \Phi\frac{d^2\Pi}{dydt}\delta y \end{aligned}\right\} \quad (11)$$

où $\Phi'\delta z = \Phi\delta y$.

Un tel circuit entièrement fermé crée des forces périodiques électriques et magnétiques dans son champ quand il est le siège d'oscillations électriques. Pour le but poursuivi, il suffit des forces électriques et magnétiques perpendiculaires au vecteur r, pris à son extrémité, quand le rayon est dans le plan xy normal au plan yz dans lequel est situé l'oscillateur. Il suffit donc de calculer la valeur de R, a et b pour le cas en question.

Si l'on remplace par M le produit $I\delta y\delta z$ en appelant ce terme le moment magnétique de l'oscillateur coudé, de telle sorte que

$$\Phi\delta y = \Phi'\delta z = M/n,$$

on obtient les équations suivantes pour les potentiels et les forces dans le champ aux points qui ne sont pas très proches de l'oscillateur

$$\begin{aligned} V &= -\frac{\Phi}{k}\frac{d\Pi}{dz} + \frac{\Phi}{2k}\frac{d^2\Pi}{dydz}\delta y - \frac{\Phi'}{k}\frac{d^2\Pi}{dzdy}\delta z \\ &= -\frac{\Phi}{k}\frac{d\Pi}{dz} - \frac{M}{2kn}\frac{d\Pi}{dydz} \\ G &= \Phi'\frac{d^2\Pi}{dzdt}\delta z = \frac{M}{n}\frac{d^2\Pi}{dydt} \\ H &= \Phi\frac{d\Pi}{dt} - \frac{\Phi}{2}\frac{d^2\Pi}{dydt^2}\delta y = \Phi\frac{d\Pi}{dt} - \frac{M}{2n}\frac{d^2\Pi}{dydt} \\ R &= -\Phi\frac{d^2\Pi}{dt} + \frac{M}{2n}\frac{d^3\Pi}{dydt^2} + \frac{\Phi}{k}\frac{d^2\Pi}{dz^2} + \frac{M}{2kn}\frac{d^3\Pi}{dydz^2} \quad (12) \\ a &= \Phi\frac{d^2\Pi}{dydt} - \frac{M}{2n}\frac{d^2\Pi}{dy^2dt} - \frac{M}{n}\frac{d^3\Pi}{dz^2dt} \\ b &= -\Phi\frac{d^2\Pi}{dxdt} + \frac{M}{2n}\frac{d^3\Pi}{dxdydt}. \end{aligned}$$

En différenciant et en groupant les termes en $\sin(mr - nt)$ et $\cos(mr - nt)$ que l'on écrit sin X et cos X pour abréger, et en remplaçant par v le rapport n/m ou $(\mu K)^{-1/2}$, μ et K étant la perméabilité et la constante diélectrique du milieu, on obtient pour R, a et b les expressions :

$$\begin{aligned} R = \Big\{ &\Phi(m^2r^2 - 1) - \Phi(m^2r^2 - 3)\left(\frac{z}{r}\right)^2 \\ &+ \frac{M}{2v}\frac{3}{mr}\left(\frac{y}{r}\right) + \frac{M}{2v}\frac{(8m^2r^2 - 15)}{mr}\left(\frac{y}{r}\right)\left(\frac{z}{r}\right)^2 \Big\}\frac{\sin X}{kr^3} \\ &+ \Big\{\Phi mr - \Phi 3mr\left(\frac{z}{r}\right)^2 - \frac{M}{2v}(m^2r^2 + 3)\left(\frac{y}{r}\right) \\ &+ \frac{M}{2v}(m^2r^2 + 18)\left(\frac{y}{r}\right)\left(\frac{z}{r}\right)^2\Big\}\frac{\cos X}{kr^3} \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a = \Big\{ &\Phi v m^2r^2\left(\frac{y}{r}\right) + \frac{M}{2}3mr\left(\frac{y}{r}\right)^2 - \frac{M}{2}3mr \\ &+ 3Mmr\left(\frac{z}{r}\right)^2\Big\}\frac{\sin X}{r^3} + \Big\{\Phi v mr\left(\frac{y}{r}\right) \\ &- \frac{M}{2}(m^2r^2 - 3)\left(\frac{y}{r}\right)^2 - \frac{3M}{2} \\ &- M(m^2r^2 - 3)\left(\frac{z}{r}\right)^2\Big\}\frac{\cos X}{r^3} \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b = -&\Big\{\Phi v m^2r^2\left(\frac{x}{r}\right) + \frac{M}{2}3mr\left(\frac{x}{r}\right)\left(\frac{y}{r}\right)\Big\}\frac{\sin X}{r^3} \\ -&\Big\{\Phi v mr\left(\frac{x}{r}\right) - \frac{M}{2}(m^2r^2 - 3)\left(\frac{x}{r}\right)\left(\frac{y}{r}\right)\Big\}\frac{\cos X}{r^3} \quad (15) \end{aligned}$$

Si l'on envisage seulement la valeur de la force électrique e et de la force magnétique d perpen-

diculairement à l'extrémité du rayon r, la première étant parallèle à l'axe de z et la dernière étant dans le plan xy, la force magnétique d dans cette direction est égale à $(ay/r)-(bx/r)$. On obtient donc sa valeur en multipliant les valeurs de a et b par q/r et x/r et en soustrayant. En faisant $z=0$ dans les équations précédentes et écrivant $\cos\theta$ pour y/r, on obtient :

$$c=\left\{\Phi(m^2r^2-1)+\frac{M}{2v}\frac{3}{mr}\cos\theta\right\}\frac{\sin X}{kr^3}$$
$$+\left\{\Phi mr-\frac{M}{2v}(m^2r^2+3)\cos\theta\right\}\frac{\cos X}{kr^3} \quad (16)$$
$$d=\left\{\Phi v m^2r^2\right\}\frac{\sin X}{r^3}$$
$$+\left\{\Phi v mr-\frac{M}{2}m^2r^2\cos\theta\right\}\frac{\cos X}{r^3}. \quad (17)$$

Si l'on désigne par E et H les amplitudes de e et d, on a finalement les expressions

$$E=\frac{1}{kr^3}\left[\left\{\Phi(m^2r^2-1)+\frac{3}{2}\frac{M}{v}\frac{\cos\theta}{mr}\right\}^2\right.$$
$$\left.+\left\{\Phi mr-\frac{M}{2v}(m^2r^2+3)\cos\theta\right\}^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$
$$H=\frac{1}{r^3}\left[(\Phi v m^2r^2)^2\right.$$
$$\left.+\left(\Phi v mr-\frac{M}{2}m^2r^2\cos\theta\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}, \quad (19)$$

où E est l'amplitude de la force électrique perpendiculairement au rayon et au plan équatorial et H l'amplitude de la force magnétique perpendiculairement au rayon et dans le plan équatorial.

Donc, puisque m^2r^2 est toujours beaucoup plus grand que $1/mr$, il est clair que, pour $\theta=180°$, les valeurs de E et H sont toutes deux plus grandes que quand $\theta=0$. Si l'on fait $M=0$ dans les équations précédentes, elles se réduisent aux valeurs données par Hertz pour les forces électrique et magnétique d'un oscillateur court rectiligne dans le plan équatorial, la force électrique étant parallèle à l'axe et la force magnétique perpendiculaire. Si mr est grand en comparaison de l'unité, on a $KE^2=\mu H^2$, ce qui montre que les énergies des composantes magnétique et électrique de l'onde deviennent égales. Il y a aussi une valeur minima de H et E correspondant à une valeur de θ telle que :

$$\cos\theta=\frac{2\Phi v}{M}\frac{1}{mr} \quad \text{ou} \quad \cos\theta=\frac{2\Phi v}{M}\frac{mr}{m^2r^2+3}. \quad (20)$$

Les expressions qui précèdent ont une faible valeur numérique quand r est grand en comparaison de la longueur d'ondes de la radiation. Il y a donc une valeur minima des forces à l'extrémité du rayon vecteur, correspondant à une valeur quelconque de l'azimuth θ inférieur à 90°.

Les observations faites par Marconi (1) montrent que les conclusions théoriques qui précèdent sont exactes. On voit que, tandis qu'un oscillateur rectiligne radie également dans toutes les directions horizontales ou dans tous les azimuths, un oscillateur coudé radie beaucoup plus facilement dans une direction et moins dans la direction opposée, en créant deux minima de radiation dans deux autres directions inclinées également par rapport à la direction de radiation maxima.

Le degré de l'inégalité de radiation dans le plan de l'oscillateur dépend du rapport des grandeurs des quantités $1/2\,Mmr$ et Φv, ou du rapport de δy à $2/m^2r$, c'est-à-dire de rapport de

$$\frac{\delta y}{{}^1/_2\,\delta z+\delta y} \quad \text{à} \quad \frac{4}{m^2rl} \quad \text{c.-à.-d. à} \quad \frac{\lambda^2}{\pi^2rl},$$

en désignant par $2l$ la longueur totale de l'oscillateur coudé. La plus grande inégalité entre la radiation dans le plan de l'oscillateur doit être atteinte quand π^2 fois le rapport de la somme des longueurs des deux parties horizontales de l'oscillateur à sa longueur totale donnent un chiffre aussi voisin que possible du produit des rapports de λ^2/l^2 et l/r. Le rapport λ/l est fixé par la forme géométrique de l'oscillateur ; l'inégalité de radiation dans le plan de l'oscillateur dépend donc essentiellement du rapport de la longueur d'ondes à la distance du point où l'on fait les observations : aux grandes distances, elle ne doit être sensible que quand on emploie des ondes de grande longueur. Ce résultat est aussi en concordance avec les observations de Marconi.

Les équations qui précèdent permettent de déterminer les lignes de force électriques dans le champ de l'oscillateur coudé. Ainsi, si R et Q sont les composantes de la force électrique dans le plan yz, l'équation différencielle pour les lignes de force dans le plan est $R\,dy-Q\,dz=0$. La substitution de valeurs de R et Q et l'intégration de cette équation conduisent à l'équation donnant des lignes de force dans le plan yz.

R. V.

(1) Voir *Éclairage Électrique*, t. XLVII, 1er juin 1906, p. 355.

Commande électrique à distance par les ondes hertziennes. — **Devaux.** — *Société internationale des Électriciens*, juin 1906.

L'auteur a établi un nouveau type d'appareils pour la commande à distance sans fil et a appliqué cet appareil à la manœuvre à distance d'un sous-marin.

Le système consiste essentiellement en une manette de distributeur tournant autour d'un axe et frottant successivement sur des plots auxquels sont reliés les différents circuits à commander, et en un commutateur qui empêche le courant de passer tant que le distributeur n'a pas atteint le plot correspondant au circuit que l'on veut fermer. Le déplacement du distributeur est produit par le jeu de l'armature d'un électro-aimant qui, dans son mouvement de va-et-vient produit par l'attraction de l'électro-aimant, agit sur une roue à rochet par l'intermédiaire d'un cliquet et fait tourner celle-ci. Le commutateur spécial est également commandé par les mouvements de l'armature qui, à cet effet, est prolongée par un bras battant contre un levier qui ferme le circuit : ce levier, muni d'une crémaillère qui engrène sur une roue dentée accompagnée d'un volant, présente dans son déplacement une inertie suffisante pour que le circuit ne puisse être fermé qu'après arrêt des battements du bras et non entre deux battements.

L'inventeur a appliqué son système à un petit sous-marin formé de deux cylindres superposés et muni d'une antenne de 3 mètres portée par un petit mât. Cet engin contenait une batterie d'accumulateurs de 450 ampère-heures fournissant l'énergie nécessaire pour la propulsion et pour les différentes manœuvres. Celles-ci étaient au nombre de neuf : marche AV; marche AR ; stop ; barre à gauche ; barre à droite ; stop ; allumage des signaux AV ou AR; lancement de la torpille.

Les expériences, faites au large du port d'Antibes, ont pleinement réussi : le poste de commande était situé à terre.

ÉCLAIRAGE

Sur quelques causes d'erreur en photométrie. — **L. W. Wild.** — *The Electrician*, 20 juillet 1906.

On méconnaît trop souvent en photométrie l'importance de l'élimination des erreurs d'angle. De telles erreurs sont beaucoup plus considérables, dans plusieurs types de photomètres, qu'on ne le suppose généralement, et ne sont pas entièrement compensées par une double mesure et par l'emploi d'une lampe de comparaison.

En général, la mesure photométrique réside dans la comparaison de l'éclairement de deux surfaces adjacentes, éclairées chacune par une source séparée. Un écran parfait est celui qui apparaît également éclairé quel que soit l'angle sous lequel il est vu, l'éclairement étant alors exactement proportionnel au cosinus de l'angle de la normale à l'écran. Malheureusement ces écrans parfaits n'existent que dans le domaine des mathémathiques.

Variation de l'éclairement avec l'angle. — On sait que l'éclairement apparent d'un écran varie un peu avec l'angle sous lequel il est vu. On sait aussi que cette variation dépend beaucoup de la nature de la surface. L'expérience suivante, effectuée sur un disque de Bunsen, peut donner diverses indications sur l'ordre de grandeur des erreurs que l'on peut ainsi commettre.

Un disque de Bunsen était placé entre deux lampes à incandescence. Il était vu sous différents angles, et l'une des deux sources lumineuses était déplacée jusqu'à ce que l'égalité des éclairements fût atteinte. L'intensité lumineuse de la lampe mobile pour différents angles de vue fut trouvée égale aux chiffres suivants.

Angle de vue.	Bougies.
20 degrés de la normale	9,0
30 —	9,4
40 —	9,7
50 —	9,9
60 —	10,0
70 —	9,5

Il semble donc, d'après ces expériences, que, dans le cas de cet écran particulier, le meilleur angle de vue soit de 50° à 60°. Pour des mesures très exactes, il est nécessaire de fixer à peu près exactement l'angle de vue : on peut, pour cela, examiner le disque au moyen d'un tube assez long.

Erreurs dues au déplacement du chariot. — On emploie différentes formes de photomètre avec deux surfaces éclairées et inclinées dans des directions opposées, les rayons lumineux des lampes tombant sur celles-ci suivant un angle considérable. Dans les appareils de Ritchie, de

Trotter, de Whitman, les rayons tombent sur les surfaces suivant des angles de 60° par rapport à la normale et les surfaces sont inclinées horizontalement : dans le photomètre de Simmance-Abadie, les rayons lumineux tombent sur les surfaces suivant des angles de 50° à 55°, et ces surfaces sont inclinées verticalement. Le chariot se déplace sur une tige ou sur des rails. Pour que le mouvement de chariot soit facile, il est impossible d'éviter un jeu horizontal entre le chariot et la tige ou les rails. Si l'on suppose que le chariot soit légèrement déplacé et tourne d'un angle horizontal de 1°, par exemple, l'éclairement est augmenté sur une surface et est réduit sur l'autre. La variation qui se produit sur chaque surface est proportionnelle à la différence entre les cosinus des angles que font les rayons avec les surfaces. Si, dans les conditions normales, les rayons atteignent des surfaces sous des angles de 60° avec les normales, une déviation de 1° du chariot provoquera une augmentation d'éclairement de 3 % sur une surface et une réduction d'éclairement de 3 % sur l'autre surface, causant ainsi une erreur totale de 6 %. Il y a bien peu de photomètres employés en pratique dans lesquels le chariot ne puisse pas présenter cette faible déviation de 1° : on peut dire que probablement les erreurs ainsi commises sont plus souvent supérieures à 6 % qu'inférieures à ce chiffre.

Dans le cas du photomètre de Symmance-Abadie, les deux surfaces sont inclinées verticalement et non horizontalement : il n'y a donc pas d'erreur due au déplacement du chariot par rapport à la glissière. Mais il y a, par contre, une source d'erreurs considérable si les roues du chariot ne sont pas tout à fait égales ou si la glissière n'est pas rigoureusement rectiligne. Dans le photomètre à papillotement, les lectures ne peuvent pas être faites à moins d'un degré près, et il en résulte des erreurs de mesure de 5 %.

Quand les deux surfaces de l'écran sont parallèles et perpendiculaires aux rayons lumineux, comme dans les photomètres de Bunsen, de Joly et de Lummer et Brodhun, un déplacement entre le chariot et la glissière ne produit pas d'erreur appréciable, car les deux surfaces vues sont toujours parallèles et un déplacement du chariot réduit dans le même rapport l'éclairement des deux surfaces.

Erreur due à l'alignement incorrect des sources lumineuses. — Si l'on prend l'appareil de Ritchie comme exemple, et si l'on suppose qu'une des sources lumineuses est déplacée horizontalement perpendiculairement à l'axe du photomètre de $1^{cm},25$ pour une distance de 75 centimètres entre la source et l'écran, les rayons atteignent l'écran sous un angle de 59° ou de 61° au lieu de 60° et on commet une erreur de 3 % dans la mesure de la puissance lumineuse. Si les deux sources lumineuses sont déplacées de cette quantité par rapport à l'alignement, l'erreur totale est de 6 %. Avec le photomètre Simmance-Abadie, un déplacement horizontal n'a pas d'effet, mais un déplacement vertical a beaucoup d'effet : l'erreur produite par un déplacement de $1^{cm},25$ sur une distance de 75 centimètres produit une erreur de 2,5 % : si les deux sources lumineuses présentent le même déplacement, l'erreur est de 5 %.

Un déplacement horizontal ou vertical de $1^{cm},25$ n'est pas rare, bien au contraire, quand on emploie des lampes à incandescence à filaments irréguliers. Même si l'on a recours à des dispositifs permettant de déplacer la lampe dans toutes les directions, pour la placer exactement sur l'alignement, il est bien difficile de trouver d'une façon suffisamment exacte le centre photométrique du filament.

Avec un écran photométrique disposé de façon que les rayons tombent perpendiculairement sur les surfaces vues, l'erreur due à un défaut d'alignement est tout à fait négligeable, un déplacement de $1^{cm},25$ sur une distance de 75 centimètres produisant une erreur de 0,02 % seulement, différence entre les cosinus des angles de 0° et 1°.

L'auteur indique que, à sa connaissance, il y a deux formes du photomètre à papillotement : celui de Simmance-Abadie et celui de Whitman. Par suite des erreurs angulaires, aucun de ces deux appareils n'est assez exact pour des mesures précises de laboratoire : l'auteur recommande plutôt l'emploi d'un simple disque de Bunsen, même quand la différence de couleur entre les deux sources lumineuses est aussi considérable que celle existant entre un bec Auer et une lampe à arc à flamme. Mais, comme l'emploi du photomètre à papillotement est nécessaire quand la couleur des sources lumineuses est très différente, l'auteur a cru utile d'étudier la question des erreurs angulaires et a été amené à formuler les principes généraux suivants qui s'appliquent à toutes les méthodes photométriques.

Principes généraux pour éviter les erreurs angulaires. — Les deux surfaces que l'on doit voir doivent être absolument parallèles, de façon qu'un déplacement entre le chariot et la glissière modifie l'éclairement des deux surfaces dans la même direction et au même degré.

Les deux surfaces doivent être normalement perpendiculaires aux rayons lumineux incidents, de façon que, si l'une ou l'autre des sources lumineuses n'est pas sur l'alignement exact, l'effet produit sur l'éclairement soit négligeable.

Les surfaces doivent être vues à travers un tube, de façon à ce que l'angle de vue ne puisse pas être modifié d'une façon appréciable. Un télescope remplit parfaitement le but.

En s'appuyant sur ces principes généraux, l'auteur a trouvé qu'il n'est pas difficile de construire un photomètre à papillotement ne présentant pas d'erreurs angulaires.

Description d'un photomètre à papillotement. — Ce photomètre consiste en une forme spéciale du disque de Bunsen tournant sous l'action d'un moteur électrique et vu au moyen d'un télescope et d'un miroir. Ce disque est découpé dans du papier blanc, et l'une de ses moitiés est imbibée de paraffine. De la sorte, l'une des moitiés est opaque et réfléchissante, et l'autre est translucide et diffusante. Le disque est entraîné par un petit moteur à 2 volts. Une faible portion de sa partie supérieure est vue au moyen d'un miroir et d'un télescope. De cette façon, une image d'une portion du disque tournant est formée à l'intérieur du diaphragme du télescope : l'oculaire est ajusté jusqu'à ce que le diaphragme apparaisse au foyer : de cette façon, la mise au point est bonne. Deux de ces photomètres, employés au laboratoire électrique de Westminster depuis trois mois, ont donné d'excellents résultats. Leur sensibilité pour des sources lumineuses de même coloration est au moins aussi bonne, et probablement meilleure que celle d'aucun autre type de photomètre actuellement employé. Pour des sources de colorations différentes, la sensibilité diminue un peu à cause de la grande vitesse de rotation qu'il faut employer pour obtenir le papillotement de la coloration. R. R.

Sur l'arc au mercure et quelques problèmes de photométrie. — F. Laporte. — *The Electrician*, 20 juin 1906.

L'auteur, sous-directeur de laboratoire central d'électricité, ajoute quelques remarques à l'étude de Bastian (1). Comme l'a indiqué ce dernier, les mesures de l'intensité lumineuse faites au laboratoire central sur une lampe à vapeur de mercure ont donné des résultats particuliers dus à quelques curieux phénomènes.

Le tube de la lampe à mercure était à $1^m,86$ de l'écran photométrique. L'appareil employé était du type de Lummer et Brodhun, et l'étalon était une lampe à incandescence. La mesure donna comme résultat 14 bougies décimales. Mais, quand la lampe à mercure était placée à une distance de $21^m,50$ de l'écran de photométrie, la mesure donnait comme résultat 25 bougies décimales.

Ce résultat qui, au premier abord, paraît anormal, a été considéré au laboratoire comme dû au phénomène de Purkinje. M. Bastian pense que, en outre, deux autres causes peuvent avoir affecté les résultats. En premier lieu, il attire l'attention sur les dimensions de la source lumineuse, qui ne peut pas être considérée comme ponctiforme. Le tube lumineux avait à peu près 20 centimètres de longueur et 1 centimètre de diamètre. L'angle maximum des faisceaux lumineux tombant sur l'écran photométrique était donc le double de l'angle dont la tangente est 10/186, ou environ 6°10′.

L'éclairement produit par une source lumineuse de ces dimensions peut facilement être calculé, si l'on tient compte de l'obliquité des rayons et si l'on suppose seulement que la radiation varie comme le cosinus de l'angle d'émission qui peut atteindre 3° de part et d'autre de la normale. L'erreur faite dans le calcul de l'éclairement en appliquant purement et simplement la loi de l'inverse du carré de la distance est donc inférieure à deux millièmes, c'est-à-dire est négligeable dans le cas considéré.

M. Bastian pense aussi que l'on peut expliquer le résultat trouvé par des différences de transparence de l'air pour les différentes radiations. Entre la première et la seconde expérience, l'épaisseur de l'air traversé variait de 1 mètre à 8,16 mètres du côté de la lampe à incandescence, et de $1^m,86$ à $21^m,50$ du côté de la lampe à vapeur de mercure. Il serait nécessaire d'admettre que les pertes de radiations jaunes et rouges pour

(1) Voir *Éclairage Électrique*, tome XLVII, 30 juin 1906, p. 505.

une augmentation d'épaisseur de $7^{m},6$ d'air aient été beaucoup plus considérables que les pertes de radiation verte pour $19^{m},6$. Il semble difficile d'admettre que l'air ordinaire puisse présenter une telle action absorbante sur les sources lumineuses ordinaires. Au contraire, on pense généralement que l'air, au voisinage de la terre, est plus transparent pour le jaune et le rouge que pour la radiation de plus courte longueur d'ondes, et la coloration jaune des lumières vues à grande distance semble confirmer cette façon de voir.

L'expérience suivante, faite au moment des essais, montre que le phénomène physiologique connu sous le nom de phénomène de Purkinje peut provoquer des résultats anormaux dans les mesures dont il s'agit.

En faisant des mesures photométriques à courtes distances, on trouve que les résultats obtenus pour la position d'équilibre du photomètre étaient systématiquement différents suivant qu'on observait l'oculaire avec l'œil grand ouvert ou avec l'œil mi-fermé. Un disque de carton percé d'un trou très petit fut alors placé devant l'oculaire. Pour une distance de $1^{m},90$ entre la lampe et l'écran photométrique, on trouva comme résultat des mesures 17 bougies décimales ou 22 bougies décimales suivant la dimension du diaphragme employé. Il semble donc que les variations observées dépendent de la sensibilité physiologique de l'œil qui diffère suivant la couleur et la quantité de lumière reçue par la rétine.

Avec le plus petit diaphragme, la sensation de différence de couleur est très faible, mais la sensibilité de l'œil pour les mesures est fortement affaiblie. Ces expériences furent faites par deux observateurs et, quoique les résultats fussent différents, la proportionnalité restait la même.

R. R.

MESURES

***Sur les ampère-heures-mètres avec induit tournant.* — E. Beckmann.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 12 juillet 1906.

L'emploi d'ampère-heures-mètres se répand de plus en plus, particulièrement dans les petites installations, grâce à leur faible prix, leur démarrage certain sous faible charge, leur impossibilité de tourner à vide, et leur faible consommation.

Les ampère-heures-mètres tournants consistent en un induit bipolaire à courant continu ne contenant pas de fer, tournant entre les pôles d'un aimant permanent quand une différence de potentiel agit entre les balais qui frottent sur le collecteur. Si cette différence de potentiel est produite par un shunt traversé par le courant à mesurer, la vitesse de l'induit est proportionnelle à l'intensité de ce courant. Les indications du compteur sont donc proportionnelles aux coulombs qui ont passé dans le shunt.

Abstraction faite de détails de construction particuliers, les compteurs se distinguent par le freinage plus ou moins important, que l'on obtient toujours par la production de courants de Foucault. La construction mécanique de l'induit nécessite un support métallique en forme de disque ou un cylindre creux, ou au moins un cercle métallique pour soutenir l'enroulement induit en fils de cuivre. Le noyau de l'induit est alors le siège des courants de Foucault qui produisent le freinage, et les efforts tendent à rendre ce freinage aussi puissant que possible, ou bien à le diminuer autant que possible.

Soient :

n, la vitesse de rotation de l'induit par unité de temps.

T, le couple moteur.

W, le couple résistant $r + qZn$.

r, le couple constant du frottement mécanique.

qZn, le couple de l'amortissement dû aux courants de Foucault.

$e = \gamma Zmn = \gamma Zn$ la force contre-électromotrice de l'induit.

Z, le champ, le champ normal étant pris comme unité.

a, la résistance de l'induit.

b, la résistance du shunt.

J, le courant total.

i, le courant dans l'induit.

$2m$, le nombre de tours d'enroulement de l'induit supposé égal à 2.

k, la différence de potentiel aux bornes du compteur.

Si l'on considère l'état d'inertie $W = T$, on a :

$$r + qZn = i\beta Z. \qquad (1)$$

Pour $n = 0$, on a, en appelant i_0 le courant de démarrage :

$$r = i_0\beta' Z \qquad (2)$$

$$i_0\beta Z + qZn = \frac{k - e}{a}\beta Z \qquad (3)$$

$$ai_0\beta Z + aqZn = k\beta Z - \gamma Z^2 n\beta \qquad (4)$$

$$n = \frac{k - ai_0}{a\frac{q}{\beta} + \gamma Z} = \frac{k\left(1 - \frac{ai_0}{k}\right)}{a\frac{q}{\beta} + \gamma Z} \qquad (5)$$

$$n = Ck\left(1 - \frac{c}{k}\right),$$

indication du compteur en volt-heures.

Pour l'ampère-heures-mètres (induit en dérivation sur le shunt b), on a :

$$k = (J - i)\,b. \qquad (6)$$

Des équations (1) et (2), on tire :

$$i_0\beta Z + qZn = i\beta Z$$

$$i = i_0 + \frac{q}{\beta} n. \qquad (7)$$

De l'équation (3), on tire alors :

$$i_0\beta Z + qZn = \frac{\left(J - i_0 - \frac{q}{\beta} n\right) b - e}{a} \beta Z$$

$$ai_0\beta + aqn = Jb\beta - i_0 b\beta - qbn - \gamma Zn\beta.$$

$$n = \frac{Jb - i_0(a+b)}{\frac{q}{\beta}(a+b) + \gamma Z} = \frac{Jb\left(1 - i_0\frac{a+b}{Jb}\right)}{\frac{q}{\beta}(a+b) + \gamma Z} \qquad (8)$$

$$n = C_1 J\left(1 - \frac{c_1}{J}\right),$$

indication du compteur en ampère-heures.

Les équations pour les volts et pour les ampères sont de la forme suivante :

$$y = x\left(1 - \frac{c}{x}\right). \qquad (8_a)$$

Donc, si l'on prend la définition de l'étalonnage ordinaire des compteurs, d'après laquelle le nombre d'ampère-heures est égal au produit de la lecture par la constante de l'appareil, on voit qu'ici cette constante de l'appareil varie avec la charge, et est de la forme :

$$f_a = y' = \frac{1}{1 - (c/x)} \qquad (8_b)$$

ou

$$y'\left(1 - \frac{c}{x}\right) = 1 : \qquad (8_c)$$

c'est l'équation d'une hyperbole, si l'on considère $\left(1 - \frac{c}{x}\right)$ comme seconde variable.

De l'équation (8_a), on peut déduire la valeur des écarts entre les indications du compteur et les chiffres proportionnels à J comme erreur relative δ :

$$\delta = y'' = -c/x \qquad (8_d)$$

ou

$$y''x = -c.$$

La courbe de l'erreur en fonction de la charge est donc une hyperbole.

Pour étudier l'influence d'une variation de la constante de l'appareil, l'auteur introduit la vitesse modifiée $n' = \xi n$, n étant la vitesse donnée par l'équation (8) pour la valeur normale de toutes les « constantes d'appareil » et ξ le « facteur d'erreur ». (Les valeurs ξ ne donnent donc pas l'erreur totale du compteur.) La variation de la constante de l'appareil est introduite par multiplication de la valeur normale par x.

1°) Variation du champ magnétique (par l'action du champ terrestre, la proximité d'autres aimants, l'action de la rémanence).

Pour la charge J, la vitesse normale de l'induit est :

$$n = \frac{Jb\left(1 - i_0\frac{a+b}{Jb}\right)}{\frac{q}{\beta}(a+b) + \gamma Z}. \qquad (8)$$

Si le champ varie de Z à xZ, et par suite i_0 de i_0 à i_0/x, on a une vitesse :

$$n' = \xi' n = \frac{Jb\left(1 - i_0\frac{a+b}{Jbx}\right)}{\frac{q}{\beta}(a+b) + \gamma x Z} \qquad (9)$$

et l'on trouve pour ξ' la valeur :

$$\xi' = \frac{Jbx - i_0(a+b)}{Jbx - i_0 x(a+b)} \times \frac{\frac{q}{\beta}(a+b) + \gamma}{\frac{q}{\beta}(a+b) + \gamma x} = \xi'_1 \xi'_2$$

en posant égale à l'unité la valeur normale de Z.

2°) Variation de la résistance de l'induit (résistance de passage des balais, variation de température). — Pour la charge J, on a à nouveau

$$n = \frac{Jb\left(1 - i_0\frac{a+b}{Jb}\right)}{\frac{q}{\beta}(a+b) + \gamma Z}. \qquad (8)$$

Si la résistance de l'induit passe de la valeur a à la valeur différente xa, on a :

$$n'' = \xi'' n = \frac{Jb\left(1 - i_0 \dfrac{ax+b}{Jb}\right)}{\dfrac{q}{\beta}(ax+b) + \gamma Z}. \qquad (10)$$

Si, de nouveau, $Z = 1$, on a pour ξ'' :

$$\xi'' = \frac{Jb - i_0(ax+b)}{Jb - i_0(a+b)} \times \frac{\dfrac{q}{\beta}(a+b) + \gamma}{\dfrac{q}{\beta}(ax+b) + \gamma} = \xi''_1 \xi''_2.$$

3°) Variation de la résistance de l'induit et variation simultanée égale de l'amortissement (produit par une variation de température dans l'enroulement et dans le noyau de l'induit, qui tous deux ont le même coefficient de température):

Pour la charge J, la vitesse n est définie par l'équation 8. Si la résistance de l'induit varie de a à xa et que le facteur d'amortissement varie de q à q/x, on a la vitesse :

$$n''' = \xi''' n = \frac{Jb\left(1 - i_0 \dfrac{ax+b}{Jb}\right)}{\dfrac{q}{\beta}\left(\dfrac{ax+b}{x}\right) + \gamma Z}. \qquad (11)$$

Si $Z = 1$, on a pour ξ''' l'expression :

$$\xi''' = \frac{Jb - i_0(ax+b)}{Jb - i_0(a+b)} \times \frac{\dfrac{q}{\beta}(a+b) + \gamma}{\dfrac{q}{\beta}\left(\dfrac{ax+b}{x}\right) + \gamma} = \xi'''_1 \xi'''_2:$$

4°) Variation des frottements mécaniques (paliers, collecteur, minuterie) : cette variation se manifeste par une variation du courant de démarrage i_0. La vitesse n est donnée par l'équation (8). Si le courant de démarrage passe de la valeur i_0 à xi_0, on a :

$$n'''' = \xi'''' n = \frac{Jb\left(1 - i_0 x \dfrac{a+b}{Jb}\right)}{\dfrac{q}{\beta}(a+b) + \gamma Z} \qquad (12)$$

d'où l'on tire

$$\xi'''' = \frac{Jb - i_0 x(a+b)}{Jb - i_0(a+b)}.$$

Pour pouvoir étudier numériquement la valeur ξ, il faut déterminer les constantes du compteur. On peut mesurer ou supposer les valeurs de J, b, a. La valeur de i_0 est donnée par la courbe du courant dans l'induit en fonction de la vitesse, au moyen d'une extrapolation graphique ou analytique jusqu'à $n = 0$. (La courbe de courant est une droite.) Il reste les constantes γ et q/β. Pour γ, on a $\gamma = e/Zn$, et, si l'on fait une détermination expérimentale avec le champ normal $Z = 1$, on a $\gamma = e/n$. Pour q/β, on a, d'après l'équation (7) :

$$q/\beta = (i - i_0)/n,$$

valeur de l'inclinaison de la droite de courant. La valeur q/β est indépendante de Z ; c'est une constante de l'induit, représentant le rapport entre le couple d'amortissement pour une certaine vitesse et le couple du courant dans l'induit.

Les trois grandeurs i_0, γ et q/β peuvent donc être déterminées d'après l'ancien essai de Kapp sur l'induit du compteur séparé du shunt b.

Pour deux compteurs, les constantes furent déterminées d'après la méthode qui précède, et leur fonctionnement fut étudié pour une variation de ces « constantes ». Le premier, fonctionnant presque sans amortissement de courants de Foucault, sera désigné dans la suite par A ; le second, avec fort amortissement, sera désigné par J.

Pour le compteur A (pleine charge 10 ampères), la mesure a donné $a = 2{,}66$ ohms à 20° (cuivre) et $b = 0{,}06315$ ohm (métal à coefficient de température extrêmement faible). La courbe tracée au moyen de l'essai de Kapp donne $\gamma = 0{,}002508$; $q/\beta = 0{,}0000\,1624$; $i_0 = 0{,}000\,56$ ampère. La carcasse de l'induit contient très peu de métal.

Pour le compteur J (pleine charge, 7,5 ampères), les valeurs sont $a = 54{,}66$ ohms à 20° (cuivre); $b = 0{,}1045$ ohm (métal à très faible coefficient de température), $\gamma = 0{,}00202$; $q/\beta = 0{,}000\,2236$; $i_0 = 0{,}0000\,33$ ampère. La carcasse de l'induit était formée par un disque plein en aluminium.

Pour ces deux compteurs, les facteurs d'erreur ξ' ξ'' ξ''' ξ'''' ont été calculés pour les valeurs suivantes de x : 0,8 ; 0,9 ; 1,1 ; 1,2 c'est-à-dire pour une variation, positive ou négative, de 10 et 20 °/₀ et pour des charges 1, 0,1 et 0,01 de la pleine charge. Les valeurs obtenues sont indiquées dans le tableau suivant.

Les valeurs ξ' du tableau montrent que, dans le compteur A, les variations du champ magnétique se transmettent entièrement aux indications de l'appareil, tandis que dans le compteur J, ces variations n'ont que très peu d'influence. La variation du champ magnétique produit simultanément une variation de la f. é. m. pour la vitesse

FACTEURS D'ERREUR ξ

	x	CHARGE EN PARTIES de la pleine charge.	I ξ'	II ξ''	III ξ'''	IV ξ''''
Compteur A à faible freinage.	0,8	1,00	1,2443	1,0033	1,0004	1,0004
		0,10	1,2374	1,0077	1,0048	1,0049
		0,01	1,1410	1,0652	1,0601	1,0636
	0,9	1,00	1,1098	1,0015	1,0002	1,0003
		0,10	1,1079	1,0037	1,0024	1,0026
		0,01	1,0702	1,0321	1,0308	1,0317
	1,1	1,00	0,9110	0,9978	0,9998	0,9998
		0,10	0,9137	0,9955	0,9976	0,9975
		0,01	0,9381	0,9656	0,9676	0,9754
	1,2	1,00	0,8333	0,9960	0,9996	0,9995
		0,10	0,8364	0,9917	0,9952	0,9950
		0,01	0,8763	0,9319	0,9353	0,9363
Compteur J à fort freinage.	0,8	1,00	1,0280	1,2073	0,9995	1,0003
		0,10	1,0251	1,2096	1,0022	1,0026
		0,01	0,9920	1,2425	1,0291	1,0301
	0,9	1,00	1,0143	1,0942	0,9998	1,0002
		0,10	1,0130	1,0953	1,0011	1,0010
		0,01	0,9976	1,1100	1,0146	1,0152
	1,1	1,00	0,9861	0,9199	1,0000	0,9999
		0,10	0,9873	0,9187	0,9989	0,9987
		0,01	0,9995	0,9149	0,9851	0,9850
	1,2	1,00	0,9723	0,8517	1,0001	0,9997
		0,10	0,9743	0,8496	0,9980	0,9974
		0,01	0,9968	0,8211	0,9695	0,9701

unité et de l'amortissement. Ces variations agissent en sens contraire sur les indications de l'appareil. Le fonctionnement plus avantageux du compteur J provient de ce que la compensation des deux effets est plus parfaite. Dans les deux compteurs, les variations diminuent avec la charge; dans le compteur J elles changent de signe. La force coercitive des aimants permanents modernes est telle que l'on n'a pas à tenir compte des variations de moment magnétique. Mais, par suite de l'emploi d'un entrefer assez important, les champs extérieurs peuvent produire des variations, sans que les aimants soient modifiés. Un faible champ extérieur produisait une variation de 3 °/₀ sur les indications du compteur A, tandis qu'un champ extérieur très puissant produisait seulement une erreur de 1 °/₀ sur les indications du compteur J. Si l'on modifie la forme du champ, de façon que l'action produite sur l'enroulement induit ne soit pas la même que celle produite sur la carcasse métallique de l'induit produisant l'amortissement, on peut modifier sensiblement les indications. On peut employer ce procédé pour régler les compteurs du type J.

En ce qui concerne les valeurs de ξ'', le compteur A semble le plus avantageux. Son induit tournant à vide, la perte de tension dans l'induit est très faible quoique la résistance d'un induit soit généralement élevée (supérieure à 50 ohms), l'existence de résistances de passage perturbatrices est très possible. La température de l'induit en pratique doit être comprise entre 0° et 40° : si le compteur est étalonné pour 20°, x peut, pour 0 et 40° (pour $\alpha = 0{,}004$) avoir la valeur 0,926 ou 1,074, et les valeurs de ξ'' sont de 1,065 ou 0,937 dans le compteur J.

Mais la résistance a ne varie pas seule : l'amortissement varie, car les carcasses sont en aluminium ou en cuivre, et il en résulte une augmentation de q avec la température. Il se produit une compensation, et les valeurs de ξ' sur le tableau montrent que dans le compteur J, cette compensation est très satisfaisante.

Au point de vue des valeurs de ξ'''', les deux compteurs sont à peu près équivalents : le compteur J a un très faible avantage. On peut noter que le frottement dû à la résistance de l'air dans le compteur est négligeable : un essai fait avec le compteur A dans le vide a montré que le couple dû à la résistance de l'air était à peine égal à 10 °/₀ du couple total.

E. B.

CHARTRES. — IMPRIMERIE DURAND, RUE FULBERT. *Le Gérant :* J.-B. NOUET.

Tome XLVIII. Samedi 25 Août 1906. 13e Année. — N° 34.

L'Éclairage Électrique

REVUE HEBDOMADAIRE DES TRANSFORMATIONS

Electriques — Mécaniques — Thermiques

DE

L'ÉNERGIE

ÉTUDE GÉNÉRALE DE LA MACHINE A COURANTS ALTERNATIFS

Le problème de la machine électrique envisagé dans toute sa généralité comporte l'analyse des phénomènes d'induction sur un stator et un rotor traversés tous deux par plusieurs courants de même pulsation dont les coordonnées : amplitude, angle de calage et angle de phase sont quelconques ; en d'autres termes c'est le problème de la machine à champ elliptique dont presque toutes les machines industrielles ne sont que des cas particuliers. Exemples :

Une machine polyphasée est le cas particulier dans lequel les différents courants agissant sont égaux en amplitude et ont des angles relatifs de calage et de phase correspondant à ceux d'un polygone régulier.

Les machines monophasées, par antithèse, comportent presque toujours deux phases de courants dont les coordonnées relatives peuvent être quelconques : ce sont des machines à champ elliptique.

La machine à courant continu elle-même peut être rattachée au même principe si on l'envisage comme le cas particulier de la machine monophasée à fréquence nulle.

La méthode que nous allons exposer est plus particulièrement relative aux machines à collecteur à bobinage uniformément reparti sur le stator comme sur le rotor, mais elle est susceptible d'être appliquée aux machines d'induction et, d'autre part, de pouvoir être généralisée pour l'interprétation des machines à pôles saillants.

I. — Exposé de la méthode.

Cette méthode d'analyse est basée :

1° Sur une équation unique qui traduit l'état d'équilibre entre la tension et les différentes f. é. m. induites dans un circuit et projetées sur un même axe.

2° Sur les transformations, d'ordre abstrait, que subit cette équation lorsqu'on change l'axe de projection, et la période de base à laquelle sont rapportés les différents courants.

Il est, tout d'abord, utile de préciser quelques définitions :

Dans une machine, il y a lieu de distinguer l'*axe* d'un courant qui est relatif à sa position dans l'espace, et la *phase* de ce courant qui a trait à sa position dans le temps ; en conséquence on devra distinguer le *décalage* d'un courant sur un autre qui sera l'angle formé par leurs axes et leur *déphasage* qui sera l'angle entre leurs phases ; le premier est mesuré dans l'espace en *avant* ou en *arrière* relativement au mouvement ; le second est mesuré dans le temps par une *avance* ou un *retard*.

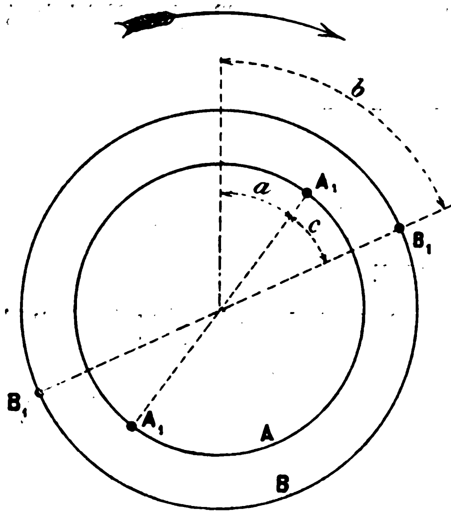


Fig. 1.

Pour fixer les idées soient (fig. 1) A et B deux enroulements concentriques sur la même machine traversés par des courants alternatifs de même pulsation. Si les axes A_1A_1 et B_1B_1 sont les axes des flux que déterminent individuellement ces courants, l'angle c formé par ces axes sera le décalage des courants ; si la période de l'un des courants est en avance ou en retard d'une fraction $\frac{\gamma}{2\pi}$ sur la période de l'autre, nous dirons que ces deux courants sont déphasés de l'angle γ (γ peut être, bien entendu, quelconque par rapport à c).

Par convention, nous admettrons qu'un *décalage en avant* et un *déphasage en retard* sont mesurés par des *angles positifs*.

Notations. — Afin de simplifier le plus possible, nous considérerons les champs (c'est-à-dire ampère-tours) au lieu de considérer les courants ; cela revient à supposer chaque enroulement ramené à une seule spire. De cette façon les nombres de spires disparaissent des formules et de plus, le coefficient d'induction, qui devient celui de la spire moyenne, prend rang de *constante fixe* de la machine. Il en est de même des résistances ohmiques qui auront pour valeurs celles que prendraient les enroulements si toutes les spires étaient en parallèle.

Rien ne sera plus simple que de passer ensuite à un enroulement à N spires ; il suffira de multiplier les tensions, courants, résistances obtenues respectivement par N, $\frac{1}{N}$ et N^2.

Cela étant dit, considérons que, sur la figure 1, A_1A_1 sont les balais du rotor en mouvement dans le sens de la flèche et B_1B_1 les bornes du stator, et soumettons chacun des enroulements à un courant alternatif.

Soient :

ω et v, la pulsation des courants, et la vitesse angulaire du rotor.

I et J, les champs respectifs (en ampère-tours) du rotor et du stator.

a et b, les décalages de I et J relativement à un axe vertical de projection oy.

α et β, leurs déphasages respectifs relativement à une phase de comparaison arbitraire.

L, le coefficient d'induction mutuelle de la spire moyenne.

m et n, les coefficients de fuite respectifs du rotor et du stator.

R et S, les résistances des enroulements supposés ramenés à une spire, respectivement pour le rotor et le stator.

u et x, les tensions induites par spire moyenne au rotor et au stator.

ε et δ, les déphasages de ces tensions sur la phase de comparaison commune aux courants.

Quelques explications sont nécessaires au sujet des coefficients L, m et n. L est le coefficient d'induction de chacun des enroulements sous le courant qui traverse l'autre enroulement supposé ramené en concordance avec le premier et tous deux n'ayant, comme il est dit, qu'une spire.

m et n sont respectivement les rapports >1 du coefficient d'induction total du rotor et du stator, au coefficient d'induction mutuel L; cela revient à dire qu'un courant I, agissant dans le rotor, induit dans son enroulement une f. é. m. proportionnelle à mLI et dans le stator une tension proportionnelle à LI.

Pendant que le fer n'est pas saturé, on peut considérer L, m et n comme constants ; à partir du moment où la saturation commence, L diminue et m et n augmentent (1).

Équation fondamentale.

La loi d'équilibre des différentes f. é. m. agissant dans un circuit s'étend à l'équilibre des projections de toutes ces f. é. m. sur un même axe. C'est-à-dire : la tension instantanée induite suivant un axe du rotor, par exemple, est la somme des projections sur cet axe des différentes f. é. m. instantanées agissant dans son circuit.

D'après cela, la tension induite suivant l'axe oy du rotor s'exprimera ainsi :

$$u \sin(\varepsilon + \omega t) = \left\{ \begin{array}{l} m\mathrm{L}\dfrac{d}{dt}\mathrm{I}\sin(\alpha + \omega t)\cos a - \mathrm{RI}\sin(\alpha + \omega t)\cos a \\ + \mathrm{L}\dfrac{d}{dt}\mathrm{J}\sin(\beta + \omega t)\cos b. \end{array} \right. \quad (1)$$

Bien que l'axe oy soit fixe, tout se passe au point de vue du phénomène instantané d'induction comme si cet axe était entraîné avec le rotor à la vitesse v, de sorte que les angles a et b doivent être considérés comme des fonctions du temps définies par leurs dérivées

$$-\frac{da}{dt} = -\frac{db}{dt} = v.$$

Par suite l'équation d'équilibre (1) devient après avoir effectué les dérivées de son second membre :

$$u \sin(\varepsilon + \omega t) = \mathrm{L} \left\{ \begin{array}{l} m\mathrm{I}\,[\omega \cos(\alpha + \omega t)\cos a + v \sin(\alpha + \omega t)\sin a] \\ + \mathrm{J}\,[\omega\cos(\beta + \omega t)\cos b + v\sin(\beta + \omega t)\sin b] \end{array} \right\} - \mathrm{RI}\sin(\alpha + \omega t)\cos a \quad (2)$$

Sous cette forme cette équation se traduit ainsi :

La tension instantanée induite suivant un axe du rotor par les différents courants agissants est la somme des projections sur cet axe de 3 groupes de f. é. m. :

I. — Les f. e. m. d'induction statique proportionnelles à l'inductance statique ωL, dirigées suivant le courant et déphasées sur lui de $\frac{\pi}{2}$ en retard, puisque

$$\cos(\alpha + \omega t) = \sin\left(\alpha + \omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

(1) Dans le cas d'une machine à pôles saillants, on est amené à considérer deux coefficients d'induction mutuelle et, pour chaque organe, deux coefficients de fuite : l'un suivant l'axe des pôles et l'autre transversalement aux pôles : ce sera le moyen de généraliser la présente théorie pour l'appliquer à ces machines.

II. — Les f. é. m. d'induction dynamique proportionnelles à l'inductance dynamique vL décalées de $\frac{\pi}{2}$ en arrière du courant puisque $\sin a = \cos\left(a - \frac{\pi}{2}\right)$ et en phase avec lui.

III. — Les f. é. m. d'effet Joule proportionnelles à la résistance R, dirigées suivant le courant et déphasées de π sur lui, puisque $-\sin(\alpha + \omega t) = \sin(\alpha t + \omega \pm \pi)$.

Le stator et le rotor peuvent être le siège de deux ou plusieurs courants : il n'y aura qu'à introduire dans l'équation chaque courant considéré isolément ; mais comme on aura toujours la faculté de décomposer au préalable chacun des courants suivant 2 axes donnés et d'obtenir la résultante de ces composantes partielles, il suffira, pour l'interprétation du problème général, de considérer seulement deux courants sur le stator et deux courants sur le rotor.

En affectant des indices 1 et 2 les quantités relatives aux deux courants de chacun des organes, on généralisera l'équation (2) comme suit :

$$u \sin(\varepsilon + \omega t) = L \left\{ \begin{array}{l} m I_1 [\omega \cos(\alpha_1 + \omega t) \cos a_1 + v \sin(\alpha_1 + \omega t) \sin a_1] \\ + m I_2 [\omega \cos(\alpha_2 + \omega t) \cos a_2 + v \sin(\alpha_2 + \omega t) \sin a_2] \\ + J_1 [\omega \cos(\beta_1 + \omega t) \cos b_1 + v \sin(\beta_1 + \omega t) \sin b_1] \\ + J_2 [\omega \cos(\beta_2 + \omega t) \cos b_2 + v \sin(\beta_2 + \omega t) \sin b_2] \end{array} \right\} \begin{array}{l} - R I_1 \sin(\alpha_1 + \omega t) \cos \alpha_1 \\ - R I_2 \sin(\alpha_2 + \omega t) \cos \alpha_2 \end{array} \quad (3)$$

Telle est l'équation fondamentale.

Transformation de l'équation fondamentale.

Le problème général se résoudra en 4 équations pour chacun des organes, rotor et stator, et ces équations seront tirées de l'équation (3) au moyen de simples substitutions de termes.

Comme, ainsi que nous l'avons dit, on a la faculté de décomposer les courants du stator et du rotor suivant 2 axes quelconques, il sera tout indiqué de choisir des axes rectangulaires et de faire coïncider ceux du rotor avec ceux du stator, et, dans un but de simplification, il s'imposera en outre d'adopter chacun de ces axes comme axe de projection ; il en résulte que, sur l'axe du courant I_1, on aura $a_1 = b_1 = 0$ et $a_2 = b_2 = \frac{\pi}{2}$, et sur l'axe du courant I_2 on aura : $a_1 = b_1 = -\frac{\pi}{2}$ et $a_2 = b_2 = 0$.

De plus, pour chaque axe de projection, on donnera successivement à ωt deux valeurs arbitraires les plus convenables au point de vue de la simplification. Par exemple, sur l'axe du courant I_1, on fera successivement $\omega t = -\alpha_1$ et $\omega t = \frac{\pi}{2} - \alpha_1$. Dans ces conditions, tout en maintenant le caractère de généralité, nous obtiendrons pour le rotor les 4 équations suivantes qui dérivent de l'équation (3) par la substitution des valeurs ci-après :

pour la 1re	$a_1 = b_1 = 0$	$a_2 = b_2 = \frac{\pi}{2}$	$\omega t = -\alpha_1$
2e	$= 0$	$= \frac{\pi}{2}$	$= \frac{\pi}{2} - \alpha_1$
3e	$= -\frac{\pi}{2}$	$= 0$	$= -\alpha_2$
4e	$= -\frac{\pi}{2}$	$= 0$	$= \frac{\pi}{2} - \alpha_2$.

(Dès maintenant nous adopterons, comme notation des angles, la désignation des vecteurs

auxquels ils se rapportent : ainsi angle $(\beta_1 - \alpha_1)$ qui est l'angle du courant J_1 avec le courant I_1 sera désigné par $\widehat{J_1I_1}$ et cette notation signifiera : angle en retard du courant J_1 sur le courant I_1).

$$u_1 \sin \widehat{u_1I_1} = L[\omega(mI_1 + J_1 \cos \widehat{J_1I_1}) + v(mI_2 \sin \widehat{I_2I_1} + J_2 \sin \widehat{J_2I_1})] \quad (4)$$

$$u_1 \cos \widehat{u_1I_1} = L[\omega(-J_1 \sin \widehat{J_1I_1}) + v(mI_2 \cos \widehat{I_2I_1} + J_2 \cos \widehat{J_2I_1})] - RI_1 \quad (5)$$

$$u_2 \sin \widehat{u_2I_2} = L[\omega(mI_2 + J_2 \cos \widehat{J_2I_2}) - v(mI_1 \sin \widehat{I_1I_2} + J_1 \sin \widehat{J_1I_2})] \quad (6)$$

$$u_2 \cos \widehat{u_2I_2} = L[\omega(-J_2 \sin \widehat{J_2I_2}) - v(mI_1 \cos \widehat{I_1I_2} + J_1 \cos \widehat{J_1I_2})] - RI_2. \quad (7)$$

Nous obtiendrons les 4 équations du stator au moyen de celles-ci, en supprimant le terme contenant le facteur V et en substituant dans les autres aux quantités relatives au rotor celles relatives au stator et vice versa, c'est-à-dire en remplaçant u_1u_2, m et R par x_1x_2 n et S et en permutant I_1, I_2 avec J_1, J_2.

$$x_1 \sin \widehat{x_1I_1} = L\omega(nJ_1 + I_1 \cos \widehat{I_1J_1}) \quad (8)$$

$$x_1 \cos \widehat{x_1J_1} = - L\omega I_1 \sin \widehat{I_1J_1} - SJ_1 \quad (9)$$

$$x_2 \sin \widehat{x_2J_2} = L\omega(nJ_2 + I_2 \cos \widehat{I_2J_2}) \quad (10)$$

$$x_2 \cos \widehat{x_2J_2} = - L\omega I_2 \sin \widehat{I_2J_2} - SJ_2. \quad (11)$$

Couple moteur. — Comme corrollaire, nous trouvons de suite l'expression du couple moteur.

Multiplions les deux membres de chacune des équations ci-dessus par le courant correspondant à la tension (pour l'équation 9 par exemple ce sera le courant J_1) et ajoutons membre à membre les produits obtenus avec 5, 7, 9 et 11 ; nous obtiendrons comme premier membre la somme des puissances *induites* wattées. Nous désignerons cette somme par $\pm P_w$ (P_w étant la puissance wattée *aux bornes* : débitée, signe + ou absorbée, signe —).

Il en résultera :

$$\frac{1}{v}[\pm P_w + R(I_1^2 + I_2^2) + S(J_1^2 + J_2^2)] = L(J_2I_1 \cos \widehat{J_2I_1} - J_1I_2 \cos \widehat{J_1I_2}). \quad (12)$$

Le premier membre est le quotient par la vitesse de la puissance totale développée (c'est-à-dire puissance induite + perte ohmique), par suite le 2e membre sera l'expression du *couple moteur* et on conclut que celui-ci est le *produit par le coefficient d'induction mutuelle de la différence entre les 2 produits du courant du rotor suivant chacun des axes par sa projection dans le temps sur le courant du stator suivant l'autre axe* (cette différence n'est bien entendu qu'une différence algébrique).

Rendement. — Si nous désignons le second membre traduisant le couple par C, le rendement sera, pour une génératrice :

$$\rho_1 = \frac{+ P_w}{v(C + C_f)} \quad (13)$$

et pour un moteur :

$$\rho_2 = \frac{v(C + C_f)}{- P_w}. \quad (14)$$

C_f étant le couple correspondant à l'hystérésis, courants de Foucault et frottements (à remarquer que dans l'expression (14), C est négatif).

Dans la plupart des cas à envisager en pratique, les formules ci-dessus trouveront encore à se simplifier sensiblement. Pour les machines polyphasées régulières, entre autres, le nom-

bre d'équations pour chaque organe se réduit à 2 au lieu de 4 ; il suffit en effet de considérer un seul axe de projection dans l'espace.

Nous nous proposons de donner quelques applications de cette méthode : en premier lieu à l'étude des moteurs monophasés et des alternateurs à collecteurs.

Mais nous avons à développer, auparavant, les considérations qui nous permettront de faire entrer en ligne de compte les courants secondaires dues à la commutation dont l'influence est dans certains cas très sensible.

Introduction des courants de commutation.

La commutation s'obtient par deux procédés distincts et donnant des résultats différents :

1° Procédé ordinaire par mise en court-circuit de la section commutée par le balai.

2° Procédé dit des *circuits en parallèles* évitant le court-circuit de section.

1° *Commutation par mise en court-circuit de la section.* — Les sections commutées étant soumises à un champ pulsatoire sont le siège de courants parasites qui ne sont limités que par la résistance de contact des balais ajoutée à la résistance propre de la section et composée avec sa réactance.

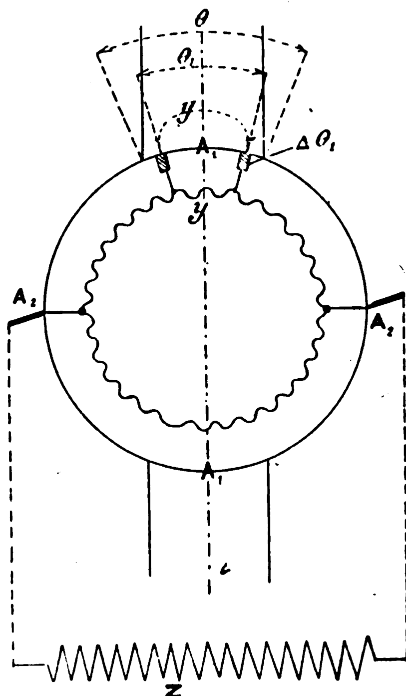


Fig. 2.

Ces courants de court-circuit peuvent être déterminés et introduits dans les équations : le moyen que nous avons trouvé le plus simple, dans ce but, consiste à dériver sur deux balais en quadrature avec les balais considérés une résistance *fictive* dont il s'agit de déterminer la valeur de telle sorte que son effet puisse se substituer à celui des courants de commutation. Par exemple (fig. 2) les balais considérés étant A_1A_1 la résistance fictive Z serait dérivée en deux points A_2A_2. — Il est aisé de se rendre compte que cet artifice équivaut à substituer un enroulement secondaire de N spires d'un transformateur, à un autre enroulement de N′ spires débitant sur résistances, en maintenant dans les deux cas la puissance débitée constante ; il est évident, dans ces conditions, qu'on ne change rien au régime primaire.

Il s'agit donc de déterminer la valeur de cette résistance Z dont les effets pourront se substituer à ceux des courants de commutation.

Soient dans ce but :

T, la résistance de contact des deux balais en série sur le même courant.

θ, l'angle (en radiant) couvert par chaque balai.

Z, la valeur de la résistance fictive.

Appelons $\Delta\theta_1$ l'arc correspondant à chaque section du collecteur. On peut considérer sous chaque balai autant de circuits fermés qu'il y a de sections de collecteur dans la demi-largeur des balais ; la résistance de contact pour chacun de ces circuits s'exprimera par $\frac{\theta T}{\Delta\theta_1}$.

La tension sur un de ces circuits, *yy*, embrassant un arc θ_1 a pour valeur :

$$\frac{u_2\theta_1}{2}$$

u_2 étant la tension aux deux points A_2A_2.

La puissance dépensée dans le circuit yy est donc

$$\Delta p = \frac{u_2^2 \theta^2}{4 T \theta} \cdot \Delta \theta_1.$$

Pour tous les circuits et sous les deux balais elle sera sensiblement :

$$2p = 2 \times \frac{1}{2} \Sigma_0^\theta \Delta p = \frac{u_2^2 \theta^2}{12 T}.$$

Par suite, pour que la résistance Z se substitue aux effets de la commutation elle devra avoir pour valeur

$$Z = \frac{12 T}{\theta^2}. \tag{15}$$

(Comme on a négligé la résistance de la section à côté de la résistance de contact qui lui correspond, on admettra par compensation que Z est la somme de la résistance fictive et de la résistance du rotor laquelle est d'ailleurs relativement très faible.)

2° *Commutation par circuits en parallèle.* — Ce procédé, préconisé par M. Marius Latour, consiste à bobiner le rotor avec p circuits en parallèle et à employer des balais dont la largeur est au plus égale à celle de $(p-1)$ sections du collecteur.

Il n'y a plus dans ce cas de sections mises en court-circuit par les balais, mais la pulsation du champ détermine néanmoins des courants parasites qui se manifestent dans les divers circuits tels que $y_1 y_1$ (fig. 3) comprenant deux enroulements partiels du rotor en série ; y compris la résistance de contact, le résistance de chacun de ces circuits est exprimée par

$$R_1 = 2 \times \left(\frac{\theta T}{\Delta \theta_1} + p R_0 \right),$$

R_0 étant la résistance du rotor, c'est-à-dire la résistance composée de tous les enroulements. Or, par définition, on a

$$p = \frac{\theta}{\Delta \theta_1} + 1.$$

Par suite l'expression de la résistance R_1 devient

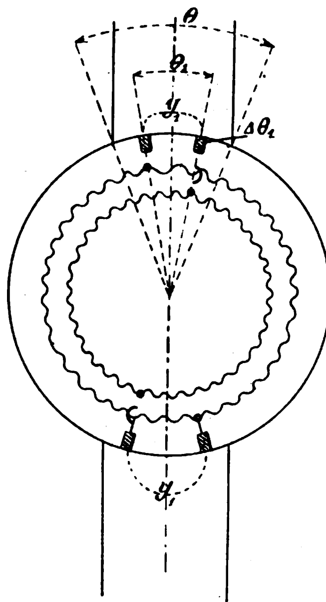


Fig. 3 [1].

$$R_1 = 2 \times \left[\frac{\theta}{\Delta \theta_1} (T + R_0) + R_0 \right].$$

Lorsque p augmente, R_0 tend à devenir négligeable à côté de $\frac{\theta}{\Delta \theta_1}(T + R_0)$ et en pratique on peut le négliger lorsque $p = 3$ ou 4.

Dans ce cas la tension agissant dans un circuit $y_1 y_1$ embrassant un arc θ_1 sous les balais est mesurée par $u_2 \theta_1$ de sorte que dans ce circuit, la puissance perdue est :

$$\Delta p = \frac{u_2^2 \theta_1^2}{2\theta (T + R_0)} \Delta \theta_1 ;$$

pour tous les circuits elle sera sensiblement :

$$\frac{1}{2} \Sigma_0^\theta \Delta p = \frac{u_2^2 \theta^2}{12 (T + R_0)}.$$

Par suite la résistance Z prend la valeur :

$$Z = \frac{12 (T + R_0)}{\theta^2}. \tag{16}$$

[1] Les quatre balais sont reliés aux deux circuits correspondants : les connexions ont été incomplètement tracées sur la figure 3.

Cette expression (16) comparée à (15) montre qu'avec le procédé des circuits en parallèle la perte due aux courants de commutation est diminuée relativement au premier procédé dans le rapport $\frac{T}{T+R_0}$.

II. — Étude du moteur série monophasé.

Dans sa disposition ordinaire, le moteur série monophasé comporte sur le stator un enroulement d'excitation et un enroulement compensateur en série avec le rotor et traversés par le même courant.

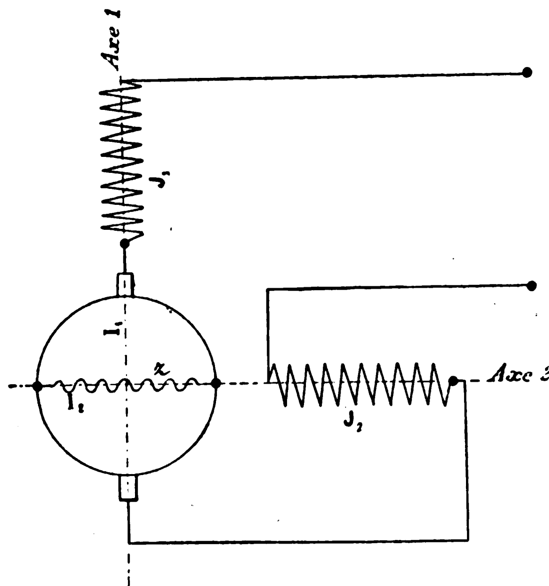


Fig. 4.

Pour application de la méthode précédente, on prendra naturellement comme axes de projection (fig. 4) :

Axe n° 1 : l'axe commun au rotor et à l'enroulement compensateur.

Axe n° 2 : l'axe de l'enroulement d'excitation en position quadrangulaire avec le n° 1.

Par suite, seront, suivant les notations générales :

u_1 tension induite par spire moyenne, dans le rotor suivant l'axe des balais.

u_2 tension induite transversalement aux balais.

x_1 tension induite par spire moyenne de l'enroulement compensateur.

x_2 tension induite par spire moyenne de l'enroulement d'excitation.

I_1 champ du rotor en ampère-tours suivant l'axe des balais.

I_2 champ du rotor en ampère-tours transversalement aux balais.

J_1 champ de l'enroulement compensateur.

J_2 champ de l'enroulement d'excitation.

Les équations générales 4 à 11 sont aussitôt applicables avec les simplifications résultant des relations suivantes particulières à cette machine :

Les courants I_1, J_1, J_2, étant en phase :

on a

$$\widehat{I_1J_2} = \widehat{I_1J_2} = \widehat{J_1J_2} = 0$$
$$\widehat{I_1I_2} = \widehat{J_1I_2} = \widehat{J_2I_2}$$

la tension u_2 étant aux bornes de la résistance fictive Z, dont le rôle a été défini précédemment ; on a en outre : $\widehat{u_2I_2} = 0$.

Par le fait de ces simplifications les équations (4) à (11) deviennent :

$$u_1 \sin \widehat{u_1I_1} = L\left[\omega(mI_1 + J_1) + vmI_2 \sin \widehat{I_2I_1}\right] \quad (17)$$
$$u_1 \cos \widehat{u_1I_1} = Lv(mI_2 \cos \widehat{I_2I_1} + J_2) - RI_1 \quad (18)$$
$$O = L\left[\omega(mI_2 + J_2 \cos \widehat{I_1I_2}) - v(mI_1 + J_1) \sin \widehat{I_1I_2}\right] \quad (19)$$
$$u_2 = -L\left[\omega J_2 \sin \widehat{I_1I_2} + v(mI_1 + J_1) \cos \widehat{I_1I_2}\right] - RI_2 \quad (20)$$
$$x_1 \sin \widehat{x_1J_1} = L\omega(nJ_1 + I_1) \quad (21)$$

$$x_1 \cos \widehat{x_1 J_1} = - SJ_1 \tag{22}$$
$$x_2 \sin \widehat{x_2 J_2} = L\omega (nJ_2 + I_2 \cos \widehat{I_2 I_1}) \tag{23}$$
$$x_2 \cos \widehat{x_2 J_2} = - L\omega I_2 \sin \widehat{I_2 I_1} - SJ_2. \tag{24}$$

Les équations 19 et 20 permettent d'éliminer les quantités auxiliaires $I_2 \cos \widehat{I_2 I_1}$ et $I_2 \sin \widehat{I_2 I_1}$ qui entrent dans les autres équations.

Après avoir remarqué que :

$u_2 + RI_2 = ZI_2$ (Z étant donné par (15) ou (16) suivant le cas),

on obtient facilement :

$$I_2 \sin \widehat{I_1 I_2} = -\frac{\frac{Z}{\omega L} J_2 - \frac{mv}{\omega}(mI_1 + J_1)}{m^2 + \left(\frac{Z}{\omega L}\right)^2} = P \tag{25}$$

$$I_2 \cos \widehat{I_1 I_2} = -\frac{mJ_2 + \frac{Z}{\omega L} \cdot \frac{v}{\omega}(mI_1 + J_1)}{m^2 + \left(\frac{Z}{\omega L}\right)^2} = Q. \tag{26}$$

Il suffit de porter ces expressions 25 et 26 (que pour simplifier nous désignons par P et Q) dans les équations (17) (18) (21) (22) (23) (24) pour obtenir les équations complètes du moteur.

Comme I_1, J_1, J_2 sont les ampère-tours d'enroulements traversés par le même courant, les nombres de spires de ces enroulements doivent être dans le même rapport que leurs ampère-tours respectifs.

Soient :

N le nombre de spires du rotor. i l'intensité commune aux divers enroulements.

U la tension aux bornes extrêmes du moteur, égale et opposée à la tension induite.

$\varphi = \widehat{Ui}$ l'angle en retard du courant i sur la tension U.

Les nombres des spires de l'enroulement compensateur et de l'enroulement d'excitation seront respectivement $\frac{J_1}{I_1} \times N$ et $\frac{J_2}{I_1} \times N$.

La tension U étant la résultante des 3 tensions partielles du rotor, de l'enroulement compensateur et de l'enroulement d'excitation qui sont respectivement $u_1 N$; $x_1 \times \frac{J_1}{I_1} \times N$ et $x_2 \times \frac{J_2}{I_1} \times N$, ses projections dans le temps sur le courant et sur la normale au courant seront la somme des projections des tensions partielles sur le même courant et sa normale, c'est-à-dire :

$$U \cos \varphi = - N \left(u_1 \cos \widehat{u_1 I_1} + \frac{J_1}{I_1} x_1 \cos \widehat{x_1 J_1} + \frac{J_2}{I_1} x_2 \cos \widehat{x_2 J_2} \right), \tag{27}$$

$$U \sin \varphi = + N \left(u_1 \sin \widehat{u_1 I_1} + \frac{J_1}{I_1} x_1 \sin \widehat{x_1 J_1} + \frac{J_2}{I_2} x_2 \sin \widehat{x_2 J_2} \right), \tag{28}$$

(Le second membre de 27 est affecté du signe — parce que la tension aux bornes est opposée à la tension induite; le second membre de 28 reste positif parce que, en outre, $\sin \varphi = - \sin \widehat{Ui}$.)

En remplaçant au second membre on obtient finalement les équations suivantes caractéristiques du moteur série monophasé

$$U \cos \varphi = -N\left[+ Lv(mQ+J_2) + L\omega \frac{J_2 P}{I_1} - RI_1 - S\frac{J_1^2+J_2^2}{I_1}\right], \qquad (29)$$

$$U \sin \varphi = N\left[L\omega\left(mI_1 + J_1 + J_1 + n\frac{J_1^2+J_2^2}{I_1} + \frac{J_2 Q}{I_1}\right) - LvmP\right]. \qquad (30)$$

Rappelons que P et Q sont donnés par 25 et 26.

Discussion.

Les rapports entre I_1, J_1 et J_2 peuvent être arbitraires ; mais il est indiqué de déterminer ces rapports pour correspondre aux meilleures conditions de fonctionnement.

La commutation la plus favorable en vitesse sera obtenue lorsqu'on aura

$$J_1 = -mI_1. \qquad (31)$$

Car s'il en est ainsi, le champ du stator étouffe totalement le champ du rotor (y compris les fuites) et les sections commutées se trouvant dans une zone complètement neutre, les effet d'inductance dynamique et même de réactance de la spire disparaissent.

Le rapport $\frac{J_2}{I_1}$ peut également être déterminé pour réaliser la condition de meilleur fonctionnement définie ainsi : minimum de pertes ohmiques totales sur le rotor pour couple donné.

La perte ohmique totale sur le rotor s'exprime par :

$$P_0 = RI_1^2 + Z\,I_2^2. \qquad (32)$$

D'après l'expression (12) le couple est donné par :

$$C = -L(J_2 I_1 - J_1 Q). \qquad (33)$$

Les relations (25), (26) et (31) permettent de déterminer :

$$I_2^2 = P^2 + Q^2 = J_2^2 \times \frac{1}{m^2 + \frac{Z^2}{\omega^2 L^2}}. \qquad (34)$$

Si on pose :

$$\frac{J_2}{I_1} = -k \qquad (40)$$

et si on substitue les valeurs données par (40), (34), (33), (31), la fonction 32 devient après simplification.

$$P_0 = \frac{1}{k}\cdot\frac{C}{L}\cdot R\left(\frac{m^2\omega^2L^2}{Z^2}+1\right) + k\cdot\frac{C}{L}\cdot\frac{\omega^2L^2}{Z}. \qquad (41)$$

On voit de suite que cette fonction passe par un minimum si on fait varier k en laissant les autres quantités constantes ; ce minimum correspond à la valeur de k qui annule la dérivée première, soit :

$$k = \frac{1}{\omega L}\sqrt{RZ\left(\frac{m^2\omega^2L^2}{Z^2}+1\right)}. \qquad (42)$$

Il est facile de reconnaître par des applications numériques que $\frac{m^2\omega^2L^2}{Z^2}$ est, entre les limites ordinaires de ses différents facteurs, toujours petit à côté de l'unité ; par suite on peut admettre très approximativement

$$k = \frac{1}{\omega L}\sqrt{RZ}. \qquad (43)$$

En remplaçant R par sa valeur $(R_0 + T)$ (R_0 résistance du rotor seul et T résistance des

balais) et Z par sa valeur donnée, suivant le cas, soit par (15) soit par (16), on aura finalement :

Pour le cas de commutation par mise en court-circuit :

$$k_1 = \frac{R_0}{\omega L \theta} \times \sqrt{12\left(1 + \frac{T}{R_0}\right) \times \frac{T}{R_0}}, \tag{44}$$

et pour le cas de circuit en parallèle :

$$k_2 = \frac{(R_0 + T)}{\omega L \theta} \sqrt{12}. \tag{45}$$

La perte ohmique totale dans le rotor est donnée, dans le 1er cas, par :

$$P_1 = \frac{C\omega\theta}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{R_0}{T} + 1}. \tag{46}$$

et dans le second cas elle se réduit à :

$$P_2 = \frac{C\omega\theta}{\sqrt{3}}. \tag{47}$$

Exemple. — Considérons un moteur dont la constante $\frac{R_0}{L}$ soit égale à 2 (ce qui correspond à peu près à un moteur à 4 pôles pesant 1500 kilogrammes).

Si on admet $\frac{T}{R_0} = \frac{1}{3}$, rapport convenable pour des balais en charbons et $\omega = 2\pi \times 25$ (soit 25 périodes), et si on adopte $\theta = 0,10$ (correspondant à des balais de 10 millimètres de largeur sur un collecteur, 4 pôles de 400 millimètres), on obtient pour le 1er cas :

$$k_1 = 0,29$$

et pour le second cas

$$k_2 = 0,58$$

Pour un couple de 150 kilogrammètres, soit à peu près 150×10^8 unités CGS, la perte ohmique dans le rotor serait

Dans le 1er cas d'après (46) :

$$P_1 = 27 \times 10^{10} \text{ ergs}/1'' \text{ (soit 27000 watts)}$$

et dans le second cas d'après (47) :

$$P_2 = 13,5 \times 10^{10} \text{ ergs}/1'' \text{ (soit 13500 watts)}.$$

On voit par là l'avantage théorique du second procédé.

Connexions résistantes. — L'emploi de connexions résistantes entre le collecteur et l'enroulement équivaut à une augmentation de la résistance de contact des balais, avec cette différence que la chaleur développée, au lieu d'être tout entière supportée par le collecteur et les balais, est absorbée en partie par ces connexions.

Celles-ci sont logées souvent dans le fond des encoches (moteurs Lamme, Siemens) ; on pourrait aussi, préférablement, semble-t-il, les placer dans des encoches intercalées entre les encoches principales et moins profondes que celles-ci afin de ne pas diminuer l'utilisation de l'induit.

Le résultat de cet artifice est de réduire la perte due aux courants de court-circuit mais, en revanche, la perte ohmique due aux courants principaux en est augmentée.

On conçoit dès lors que ces connexions doivent être proportionnées pour obtenir le résultat le plus favorable c'est-à-dire minimum de pertes ohmiques. Il est donc utile de les déter-

miner par l'analyse, ce qui revient à déterminer la valeur la plus favorable du rapport $\frac{T}{R_0}$ de la résistance de contact des balais à la résistance propre du rotor ; le rapport $\frac{J_2}{I_1} = -k$ sera alors à choisir arbitrairement.

Si dans la fonction (41) exprimant la perte ohmique totale du rotor, on introduit les valeurs de R et de Z, cette fonction devient à très peu près, pour le cas de commutation par mise en court-circuit

$$P_1 = \frac{C(R_0 + T)}{kL} + \frac{kCL\omega^2\theta^2}{12T}. \tag{48}$$

Il est aisé de trouver la valeur de $\frac{T}{R_0}$ qui rend cette fonction minimum, on obtient :

$$\frac{T}{R_0} = \frac{k\omega\theta L}{\sqrt{12}\, R_0}. \tag{49}$$

La valeur minimum que prend la fonction (48) est par suite

$$P_1 = \frac{CR_0}{kL} + \frac{C\omega\theta}{\sqrt{3}}. \tag{51}$$

Le premier terme du second membre est relatif à la perte ohmique que subirait l'induit sous un courant continu qui déterminerait le même couple ; le 2ᵉ terme est relatif à la perte due aux courants de court-circuit.

Dans le cas de circuits en parallèle, le rapport $\frac{T}{R_0}$ se déduit de l'équation (45) ; il est :

$$\frac{T}{R_0} = \frac{k\omega\theta L}{\sqrt{12}\, R_0} - 1. \tag{52}$$

La perte ohmique totale reste donnée par l'expression (47).

Les raisonnements qui précèdent s'appliquent au cas limite, c'est-à-dire pour collecteur infiniment divisé ; mais en pratique lorsque la division sera telle que chaque balai recouvre 2 ou 3 sections, la différence entre le cas limite envisagé et la réalité sera d'ordre insignifiant.

Résultats définitifs.

En portant dans (29) et (30) les valeurs suivantes résultant de ce qui précède

$$\left.\begin{array}{l} J_1 = -mI_1 \\ J_2 = -kI_1 \\ P = kI_1 \dfrac{\omega L}{Z} \\ Q = kI_1 \left(\dfrac{\omega L}{Z}\right)^2 \end{array}\right\} \text{valeurs très approchées.}$$

et en remarquant que $NI_1 = N'i$ (i étant le courant d'alimentation), on obtient finalement les équations suivantes :

$$U \cos \varphi = N'i \left[Lvk \left(1 - \frac{\omega^2 L^2}{Z^2}\right) + L\omega k^2 \frac{\omega L}{Z} + R + S(m^2 + k^2) \right], \tag{53}$$

$$U \sin \varphi = N'i \left[L\omega \left(-m + m^2 n + nk^2 - \frac{k^2}{m} \frac{\omega^2 L^2}{Z^2}\right) - Lvmk \frac{\omega L}{Z} \right]. \tag{54}$$

Ces équations se résolvent sous la forme

$$A_1 v^2 + A_2 v + A_3 + \left(\frac{U}{i}\right)^2 = 0,$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_4 v + A_5}{A_6 v + A_7}.$$

dans lesquelles les coefficients $A_1 A_2$, etc. sont les facteurs numériques résultant des dimensions de la machine et des données.

J. PERRET.

NOUVEAUX SYSTÈMES POUR L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE DES TRAINS

(Suite) (1).

SYSTÈME VICKERS-HALL.

Ce système emploie une double batterie. Le réglage de la tension est obtenu par des moyens électriques et par des moyens mécaniques. Le schéma général de l'installation est indiqué par la figure 1. Les appareils principaux sont : une dynamo génératrice D, un coffret

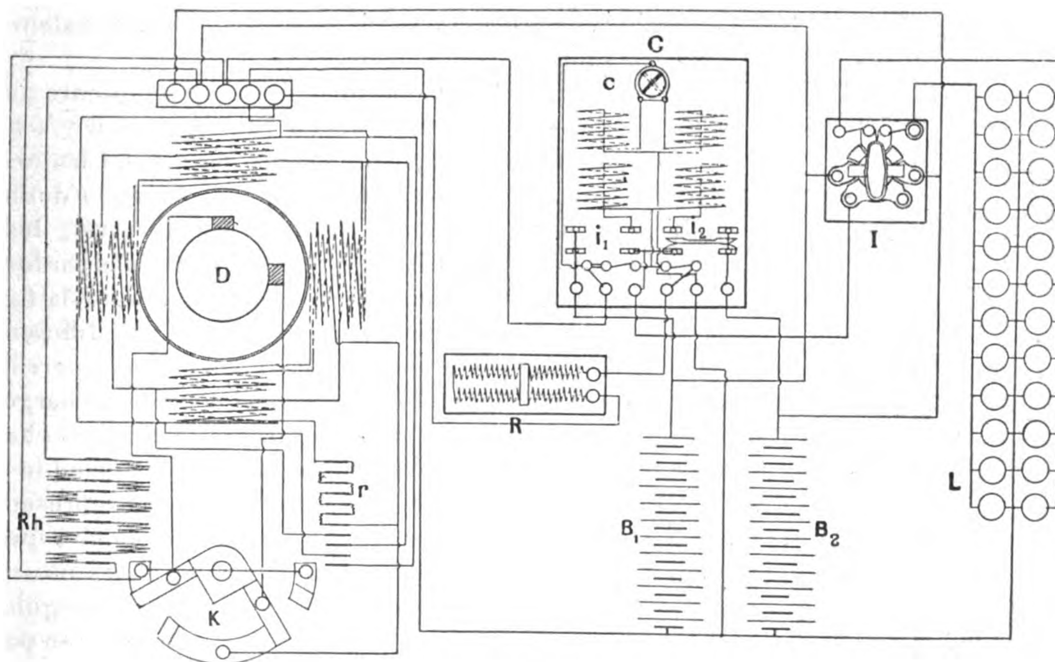


Fig. 1. — Schéma des connexions du système Vickers-Hall.

C contenant les appareils de commande (interrupteurs automatiques), un interrupteur principal I et un régulateur de débit R. Les deux batteries B_1 et B_2 comprennent chacune une douzaine d'éléments.

La dynamo génératrice D est munie d'un inverseur K, fonctionnant quand le sens de ro-

(1) Voir *Éclairage Electrique* tome XLVI, 10 février 1906, p. 208.

tation varie, et d'un curseur agissant sur un rhéostat et commandé par un régulateur à force centrifuge. Un second rhéostat, dont le contact glissant est commandé par le même régulateur, est destiné à empêcher les variations de lumière au démarrage et à l'arrêt. L'inverseur est déplacé de 30° dans un sens ou dans l'autre quand le sens de rotation change, et relie les balais aux bornes extérieures de telle façon que le courant ait toujours la même direction dans le circuit extérieur.

Les inducteurs de la dynamo génératrice sont munis de deux enroulements, un enroulement shunt et un enroulement série dont l'action est différentielle. Le nombre de tours de l'enroulement série et la résistance intercalée dans le circuit de l'enroulement shunt sont réglés par le contact glissant qui se déplace sur les plots de contact *r* : on voit que les premiers plots sont connectés à différents points de l'enroulement série et que les suivants sont reliés entre eux par des résistances interposées dans l'enroulement shunt. Quand le train est arrêté, tous les tours de l'enroulement série sont court-circuités; quand la vitesse augmente, les sections de cet enroulement sont mises successivement en circuit. Le flux est ainsi affaibli quand la vitesse augmente. Une fois ce mode de réglage épuisé, si la vitesse augmente encore, le contact glissant introduit dans le circuit de l'enroulement shunt des résistances de valeur croissante.

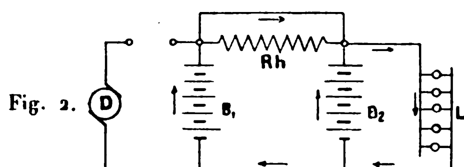


Fig. 2.

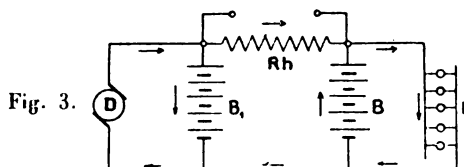


Fig. 3.

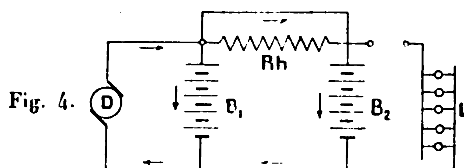


Fig. 4.

Le coffret C contient deux interrupteurs automatiques qui ferment et ouvrent, quand il y a lieu, le circuit de la dynamo et des batteries. Chaque interrupteur est actionné par un solénoïde à double enroulement. Quand le train est à l'arrêt, les deux batteries B_1 et B_2 sont reliées aux lampes par les interrupteurs automatiques, comme l'indique la figure 2. Quand le train a démarré et que la différence de potentiel aux bornes de la dynamo a atteint une valeur suffisante, l'un des deux interrupteurs est fermé par l'action de la bobine shunt des solénoïdes et agit pour mettre en charge l'une des batteries. Le schéma des connexions est indiqué par la figure 3 : la dynamo charge la batterie B_1 et alimente les lampes concurremment avec la batterie B_2. Enfin, quand le circuit des lampes est coupé, les deux batteries sont en charge, d'après le schéma représenté par la figure 4. La résistance R*h* figurée sur les trois schémas (fig. 2, 3, 4) est celle que représente la figure 1 (à gauche de l'inverseur K) : elle est intercalée entre les deux pôles positifs des deux batteries et peut être court-circuitée par un contact glissant porté par le régulateur à force centrifuge. Grâce à l'emploi de cette résistance, la dynamo peut travailler en parallèle avec la batterie B_2 (fig. 3) pour l'alimentation des lampes, tout en chargeant la batterie B_1. On évite ainsi les variations de tension qui auraient lieu si une batterie déchargée était brusquement remplacée par une batterie chargée pour l'alimentation du circuit des lampes. La résistance est mise graduellement en circuit ou hors circuit.

Les bobines série des solénoïdes des interrupteurs automatiques ont pour fonction de renforcer l'action des bobines shunt et de maintenir énergiquement les noyaux soulevés quand le courant passe dans la bonne direction. Si la vitesse de la dynamo génératrice diminue, et par suite sa différence de potentiel aux bornes, la batterie tend à se décharger

dans la machine, le courant dans la bobine série de l'interrupteur change de sens, et son action démagnétisante provoque l'ouverture de l'interrupteur sous l'effet d'un ressort : la batterie est alors coupée de la dynamo et reliée aux lampes. Un commutateur, actionné par deux rochets sur lesquels agissent les noyaux des solénoïdes, sert à alterner le fonctionnement des batteries, de façon que tantôt l'une tantôt l'autre se charge ou se décharge.

Le régulateur de débit consiste en un rhéostat réglable intercalé dans le circuit shunt d'excitation de la dynamo génératrice pour régler le débit de celle-ci suivant les conditions du trajet.

D'après ce qui précède, on peut suivre immédiatement le fonctionnement du système. Quand le train est arrêté, les deux batteries sont directement reliées à l'interrupteur principal et fonctionnent en parallèle pour alimenter les lampes. Quand le train démarre, la f. é. m. de la dynamo augmente avec la vitesse et, lorsqu'elle a atteint une valeur déterminée, l'un des interrupteurs automatiques connecte la batterie correspondante et la dynamo. La résistance R*h* est alors complètement court-circuitée : la dynamo et les deux batteries travaillent sur les lampes. Quand la vitesse de la dynamo augmente, la différence de potentiel aux bornes tend à s'élever ; à ce moment la résistance R*h* est mise progressivement en circuit par le curseur. L'une des batteries se charge alors, pendant que l'autre batterie et la dynamo travaillent en parallèle sur les lampes. Si l'interrupteur des lampes est ouvert, les pôles positifs des deux batteries sont reliés par l'intermédiaire du balai auxiliaire de cet interrupteur qui connecte les contacts du court-circuit : les deux batteries se chargent donc en parallèle sur la dynamo. A l'arrêt, tout revient à la position initiale.

Système Dowie.

L'inventeur emploie plusieurs courants de tensions différentes, le courant à la tension la plus élevée assurant la charge de la batterie d'accumulateurs. La dynamo génératrice, établie comme une petite commutatrice, produit simultanément du courant continu et du courant alternatif monophasé ou polyphasé. La batterie est reliée, par l'intermédiaire d'un interrupteur, aux bornes à courant continu de la génératrice.

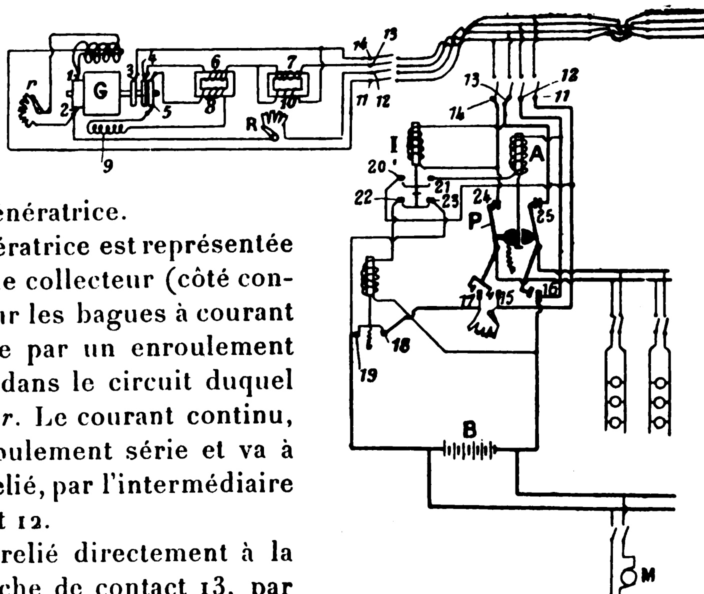


Fig. 5. — Schéma des connexions du système Dowie.

Sur le schéma de la figure 5, la génératrice est représentée en G : deux balais 1 et 2 frottent sur le collecteur (côté continu), et deux balais 3 et 4 frottent sur les bagues à courant monophasé. L'excitation est assurée par un enroulement série et par un enroulement shunt dans le circuit duquel est intercalé un rhéostat de champ *r*. Le courant continu, provenant du balai 1, traverse l'enroulement série et va à la fiche de contact 11 : le balai 2 est relié, par l'intermédiaire d'un rhéostat R, à la fiche de contact 12.

Du côté alternatif, le balai 3 est relié directement à la fiche 14 : le balai 4 est relié à la fiche de contact 13, par l'intermédiaire des deux enroulements des transformateurs 6 et 7 parcourus en série par le courant alternatif : le secondaire 8 du premier transformateur est relié à un enroulement excitateur 9 de la génératrice par l'intermédiaire d'un commutateur redresseur 5 calé sur l'arbre de la machine à côté des

bagues 3 et 4. Le transformateur 7-10 agit comme régulateur de tension : son primaire 7 est traversé en série par le courant alternatif, et son secondaire 10 est relié en dérivation aux deux conducteurs à courant alternatif.

Les fiches de prise de courant 11, 12, 13, 14 sont reliées par des accouplements flexibles, à des câbles qui courent tout le long du train et desservent chaque voiture. Sur l'une de celles-ci, par exemple, le courant continu est amené en 11-12, et le courant alternatif en 13-14. Les bornes 11-12 à courant continu sont reliées aux pôles 15 et 16 d'un interrupteur automatique, le pôle 16 étant lui-même relié à l'un des pôles de la batterie B. Entre les contacts 15 et 17 est interposé un rhéostat réglable : ce dernier contact est relié au contact 18 d'un interrupteur à commande électromagnétique qui établit la jonction avec le contact 19 relié à l'autre pôle de la batterie. Celle-ci peut encore être chargée par la machine M, dont le circuit est normalement coupé par un interrupteur bipolaire.

Un interrupteur de commande I est actionné par un solénoïde excité par le courant alternatif des bornes 13 et 14. Lorsque le noyau du solénoïde est attiré, cet interrupteur relie ensemble les contacts 20 et 21, 22 et 23 : dès que le noyau retombe, les connexions sont interrompues. Un autre interrupteur automatique A est actionné par un solénoïde qu'excite le courant continu dérivé des conducteurs 11 et 12 lorsque l'interrupteur I est fermé. Une dérivation passe par le point P qui entraîne dans le soulèvement du noyau du solénoïde, une tige de commande, et que rappelle un ressort antagoniste. Quand le noyau est soulevé (position figurée sur le schéma, réalisée lorsque le courant alternatif excite le solénoïde de l'interrupteur I et provoque la fermeture de la jonction 20-21), les conducteurs du courant alternatif se trouvent reliés aux circuits des lampes, par l'intermédiaire des contacts 24 et 25. Quand, au contraire, le noyau est abaissé, ce sont les contacts inférieurs 16, 15 et 17 qui sont reliés aux circuits des lampes, qu'alimente alors la batterie.

Le courant continu servant à la charge de la batterie passe par la résistance de réglage et par l'interrupteur-disjoncteur électromagnétique 18-19 : quand la charge est complète, la différence de potentiel est suffisante pour que le solénoïde de l'interrupteur-disjoncteur attire son noyau : le circuit est alors rompu en 18-19.

Quand, par suite de l'arrêt du train ou d'une autre cause, le courant alternatif cesse de parvenir aux bornes 13 et 14 de la voiture, le noyau du solénoïde de l'interrupteur I retombe sous l'action du ressort ; la jonction 20-21 est rompue, ainsi que la jonction 22-23. Les contacts 24 et 25 sont ouverts ; les contacts 16, 15 et 17 sont fermés, ces deux derniers court-circuitant la résistance de réglage, et la batterie alimente les lampes.

Système de la Consolidated Railway Electric Light C°.

Dans ce système, on maintient constante la différence de potentiel aux bornes de la dynamo quelle que soit la vitesse de rotation, en intercalant d'abord dans le circuit d'excitation, puis dans le circuit des lampes des résistances dont la valeur varie avec la vitesse de rotation de la machine. Le rhéostat de champ est commandé par un petit moteur électrique : ce moteur est mis en action par le jeu d'un solénoïde dont le noyau est équilibré par des ressorts. Un conjoncteur-disjoncteur automatique complète l'équipement. Le schéma de la figure 6 représente les connexions entre les différents appareils.

La dynamo génératrice D est fixée sous le châssis et entraînée par un essieu au moyen d'une courroie. Elle est bipolaire ; les pôles sont feuilletés, et l'excitation est uniquement shunt. Un dispositif calé sur l'arbre provoque le déplacement de 90° des porte-balais lorsque

la vitesse de rotation change : de cette façon le sens du courant reste toujours le même quel que soit le sens de rotation.

Quand la différence de potentiel aux bornes de la dynamo génératrice D atteint une valeur suffisante, les bobines inférieures du conjoncteur-disjoncteur CD agissent et provoquent la fermeture du circuit en A : la dynamo est ainsi reliée en parallèle avec la batterie d'accumulateurs B. Le courant passe par les bobines supérieures du conjoncteur-disjoncteur et par le solénoïde S. La dynamo assure l'éclairage et charge en même temps la batterie. Si la vitesse et, par suite, la différence de potentiel aux bornes de la dynamo augmentent, le solénoïde S attire son noyau à cause de l'augmentation d'intensité du courant circulant dans le circuit : le déplacement du noyau met en circuit le petit servomoteur M qui fait tourner la manette du rhéostat de champ R*h* jusqu'à ce que l'intensité du courant principal soit retombée à une valeur convenable : le noyau du solénoïde revient alors à sa position normale. Quand la vitesse et, par suite, la différence de potentiel aux bornes de la dynamo diminuent, le ressort antagoniste du noyau du solénoïde S exerce une action prépondérante, et manœuvre un interrupteur-inverseur qui met le moteur M en mouvement en inversant son sens de rotation. Le courant produit par la dynamo génératrice reste ainsi à peu près constant. Pendant que la batterie se charge, la différence de potentiel à ses bornes augmente sensiblement : pour que la différence de potentiel reste constante aux bornes des lampes, on a prévu un rhéostat R qui introduit dans le circuit des lampes une résistance de valeur variable au moment où le rhéostat R*h* modifie la résistance dans le circuit d'excitation de la machine.

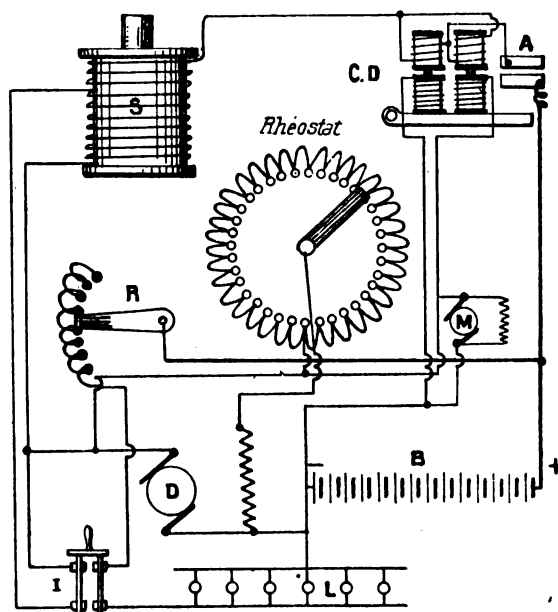
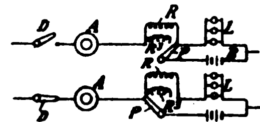


Fig. 6. — Schéma des connexions du système de la Consolidated Ry Electric Co.

Le régulateur est réglé pour la vitesse moyenne pour laquelle le débit est suffisant pour charger la batterie sans la surcharger. Une partie du solénoïde S peut être court-circuitée par l'interrupteur bipolaire I.

Système Finney Mac-Elroy.

Les dispositions principales de ce système ont déjà été décrites(¹), mais des modifications importantes ont été apportées par l'inventeur. Les deux circuits distincts de lampes alimentés l'un par la batterie et l'autre par la dynamo génératrice ont été supprimés ; les lampes font partie d'un seul circuit, alimenté soit par l'une, soit par l'autre des sources du courant. Pour régler la différence de potentiel aux bornes des lampes et aux bornes de la batterie, on emploie deux résistances distinctes indépendantes l'une de l'autre ; la valeur de la résistance intercalée dans le circuit de la batterie est réglée par un appareil automatique : celle de la résistance intercalée dans le circuit des


Fig. 7 et 8.

(¹) *Éclairage Électrique*, tome XLIV, 15 juillet 1905, page 61.

lampes est invariable. Les figures schématiques 7 et 8 font comprendre immédiatement le montage adopté dans ce but, A représentant la dynamo génératrice, D le conjoncteur-disjoncteur, B la batterie, R la résistance intercalée dans le circuit des lampes L quand celles-ci sont alimentées par la dynamo génératrice et mise hors circuit quand elles sont alimentées par la batterie; R^3 la résistance automatiquement réglable intercalée dans le circuit de la batterie pour la charge de celle-ci et P la manette du régulateur. Cette manette et le conjoncteur-disjoncteur D sont solidaires. La résistance des lampes est établie pour absorber, par exemple, 10 volts sur 70 volts produits par la génératrice : il y a donc 60 volts aux bornes des lampes, tandis qu'on dispose de 70 volts pour charger les accumulateurs : le déplacement de la manette P vers la gauche (fig. 8) produit une augmentation progressive de la différence de potentiel disponible aux bornes de ceux-ci.

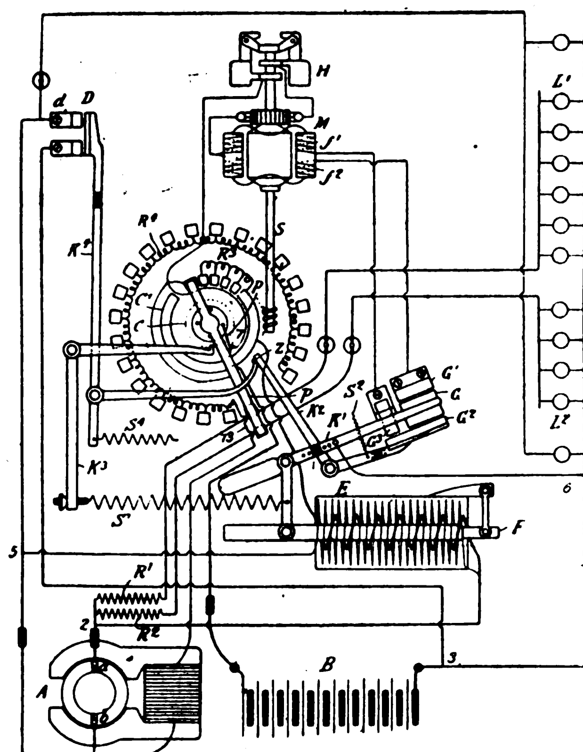


Fig. 9. — Système Finney Mac-Elroy.

La figure 9 représente le schéma des connexions et les dispositions générales. Quand le conjoncteur est fermé, le courant engendré par la dynamo génératrice part du balai *a* par exemple, et bifurque au point 2 pour alimenter le circuit des lampes et la batterie. Le circuit des lampes contient les résistances R^1 et R^2 en parallèle, résistances qui correspondent à la résistance R des figures 7 et 8 et sont en série avec les groupes de lampes L^1 et L^2. De là, le courant suit le fil extérieur qui aboutit au point 3, passe par le conjoncteur-disjoncteur D et revient au balai inférieur *b* de la machine. Le circuit de la batterie, dérivé en 2 sur le circuit précédent, comprend l'enroulement série de l'électro-aimant E, la bague de contact C^1 du régulateur, le bras de contact P, la batterie, et aboutit au point 3.

Quand le train démarre, le bras P est dans la position figurée sur la figure 8 : le courant de la batterie passe par le point 13, où le bras P est en contact avec les deux fils aboutissant aux circuits des lampes : celles-ci sont donc alimentées par le courant de décharge des accumulateurs. Le régulateur, commandé par un petit moteur *a*, introduit dans le circuit d'excitation de cette dynamo une résistance de valeur croissante à mesure que la vitesse du train augmente : ce petit moteur M est commandé par l'action de l'électro-aimant E muni d'un enroulement en dérivation aux bornes de la machine : les dispositions sont telles que la différence de potentiel aux bornes de la dynamo soit invariable, quels que soient la vitesse du train, le nombre des lampes allumées, et le courant absorbé par la batterie. Ce même électro-aimant commande aussi le conjoncteur-disjoncteur D. Le noyau F de l'électro-aimant agit sur le levier K^1 qui porte une pièce mobile G susceptible de venir en contact avec des pièces fixes G^1 et G^2. La pièce G est reliée par un fil au point 6 du circuit de la batterie. Suivant la position du noyau F, le courant passe en G^1 ou G^2 et excite l'une ou l'autre des bobines inductrices f_1 ou f_2 du moteur M, enroulées en sens inverses : le moteur tourne

alors dans l'un ou l'autre sens et entraîne le bras P du régulateur; la valeur de la résistance R^4, intercalée dans le circuit d'excitation de la dynamo génératrice, augmente ou diminue. Le circuit du moteur passe par le régulateur à force centrifuge H, qui limite la vitesse de rotation en coupant le circuit dès que celle-ci dépasse une certaine valeur, et rejoint le pôle opposé de la batterie en passant par le point 7. Quand le régulateur est à la position de repos, pour laquelle la dynamo ne produit plus de courant, un goujon Z vient en contact avec l'extrémité d'un levier d'angle K^2 et interrompt la jonction entre le contact GG_2 : le circuit du petit servo-moteur, passant par la bobine f_1, est ainsi coupé : le circuit qui passe par la bobine f_2 reste tel quel, de façon que le moteur puisse tourner à nouveau quand la différence de potentiel revient à sa valeur normale et quand l'électro-aimant E agit à nouveau. Quand le régulateur recommence à fonctionner sous l'action de cet électro-aimant, sur le noyau duquel agit la bobine shunt excitée par la génératrice, le conjoncteur-disjoncteur D est fermé par le levier K^4. Le bras de contact P règle la valeur de la résistance R^3 intercalée dans le circuit de la batterie. Celle-ci commence à se charger, et les lampes sont alimentées par une génératrice. La position du bras P suit toutes les variations de vitesse du train.

Système Bliss.

Le réglage de la différence de potentiel de la génératrice est obtenu par l'emploi de deux forces contre-électromotrices proportionnelles à la différence de potentiel aux bornes de la dynamo génératrice et au courant de charge de la batterie. Ces deux forces contre-électromotrices sont produites par une petite dynamo à double enroulement induit et à double collecteur dont l'inducteur est excité par le courant de charge de la batterie. Cette machine est entraînée par un moteur shunt relié aux bornes de la génératrice. L'une des forces contre-électromotrices agit sur le circuit d'excitation de la dynamo génératrice pour affaiblir le courant d'excitation quand la vitesse augmente; la seconde force contre-électromotrice est intercalée dans le circuit des lampes quand celles-ci sont alimentées par la génératrice, travaillant en même temps à charger la batterie.

L'examen du schéma des connexions représenté par la figure 10 fait aisément comprendre le système de réglage et les dispositions adoptées. La dynamo génératrice D est une machine tétrapolaire cuirassée : son arbre creux est enfilé sur l'essieu moteur et est entraîné par celui-ci par l'intermédiaire de bras et de ressorts, réalisant un accouplement flexible et élastique. Les balais servant à recueillir le courant sont supportés par un porte-balais qui tourne de 90° quand le sens de rotation de la machine change : le sens du courant reste ainsi invariable.

L'appareil CD est un conjoncteur-disjoncteur automatique effectuant les connexions de la génératrice avec le circuit d'utilisation quand la différence de potentiel aux bornes a atteint une valeur convenable. Cet appareil comporte, à sa partie supérieure, un anneau A conique formant trois pièces de contact que court-circuite un bouchon conique lorsque le disjoncteur abaissé a ouvert le circuit. Cet anneau a été représenté deux fois sur la figure 10 pour rendre le schéma plus clair. La partie électromécanique du conjoncteur-disjoncteur CD est formée par un solénoïde à deux enroulements et un noyau : l'un des enroulements est excité en dérivation par la génératrice et produit le soulèvement du noyau quand la différence de potentiel aux bornes atteint la valeur convenable; l'autre enroulement est excité en série par le courant total et renforce l'action de l'enroulement shunt quand le courant passe dans le bon sens : au contraire, il provoque l'ouverture du disjoncteur quand le courant tend à s'inverser par suite d'une diminution de la différence de potentiel engendrée.

Le contact triple placé au-dessus du noyau et court-circuité par un bouchon conique lorsque le noyau n'est pas soulevé a plusieurs fonctions. Tout d'abord, le bouchon est isolé du noyau et relié, par un fil souple, à une borne isolée à laquelle est fixée une résistance dont l'autre extrémité aboutit à l'un des trois segments de l'anneau. Cette résistance se trouve intercalée dans le circuit de l'enroulement à fil fin du solénoïde quand le noyau est soulevé, et est court-circuitée quand le noyau est abaissé. Elle a pour but de réduire le courant dans l'enroulement à fil fin lorsque le noyau est soulevé, afin que le moindre courant de décharge de la batterie dans la génératrice produise sûrement la rupture du circuit, tandis que, pour la fermeture du circuit au moment où la tension engendrée atteint la valeur convenable, l'enroulement à fil fin est parcouru par un courant suffisamment intense pour provoquer un fonctionnement certain. Outre cette fonction, le contact triple A a pour fonction de court-circuiter le dévolteur du circuit des lampes quand le disjoncteur CD est ouvert, et d'établir ainsi une jonction directe entre la batterie et les lampes.

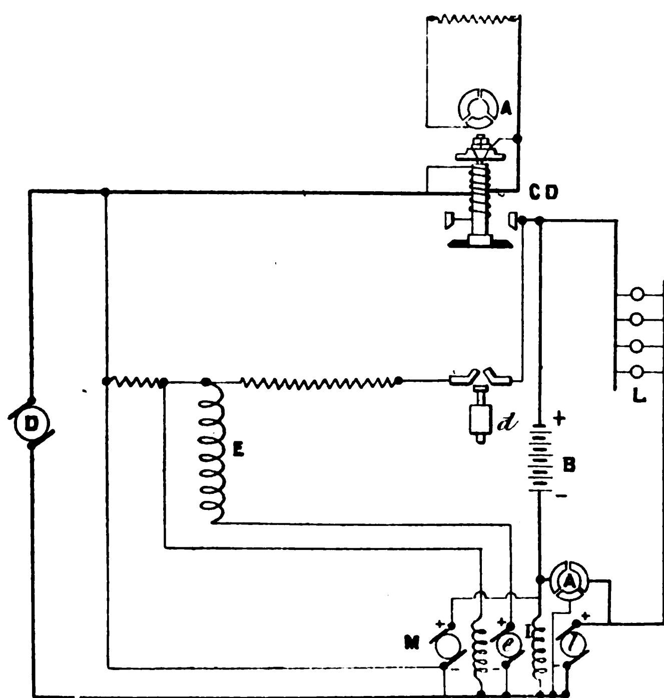


Fig. 10. — Système Bliss.

Le dévolteur double est constitué par un moteur shunt M relié en dérivation aux bornes de la génératrice D, et de deux induits (bobinés sur un même noyau) *e* et *l* qui tournent dans un même flux produit par l'enroulement inducteur I excité par le courant de charge de la batterie B. La force contre-électromotrice produite par l'induit *e*, à peu près proportionnelle au courant de charge dans l'enroulement I (puisque la vitesse de rotation du moteur M est, à peu de chose près, constante), agit pour affaiblir le courant d'excitation dans l'enroulement inducteur E de la génératrice; la force contre-électromotrice produite par l'induit *l* agit pour affaiblir la différence de potentiel agissant sur le circuit des lampes, lorsque celles ci sont alimentées par la dynamo, travaillant en même temps à charger la batterie. De la sorte, la différence de potentiel aux bornes de la batterie en charge peut être plus élevée que la différence de potentiel aux bornes des lampes et peut varier tandis que celle-ci reste constante. Quand les lampes sont alimentées par la batterie B, l'inducteur I et l'induit *l* sont en court-circuit et la jonction directe est établie en A : d'ailleurs le moteur M ne tourne que tant que la génératrice fonctionne, et s'arrête avec celle-ci. Le courant d'excitation de la génératrice et du moteur est emprunté à la batterie afin d'obtenir un amorçage rapide. On a prévu à cet effet un interrupteur auxiliaire, commandé par un cylindre à air branché sur la canalisation des freins. Aussitôt que la locomotive est attelée au train, l'interrupteur ferme le circuit d'excitation. Quand le conjoncteur-disjoncteur fonctionne, il court-circuite cet interrupteur.

La dynamo génératrice est établie pour donner 64 volts à la vitesse de 32 kilomètres à l'heure. Cette tension croît lentement jusqu'à 80 volts, tension atteinte pour une vitesse de

96 kilomètres à l'heure. La batterie comprend 32 éléments : la différence de potentiel au début de la charge est donc de 64 volts et, en fin de charge, de 80 volts. Pour le circuit des lampes, les seize ou dix-huit volts d'écart sont contre-balancés par la force contre-électromotrice du dévolteur *l*.

R. DE VALBREUZE.

REVUE INDUSTRIELLE ET SCIENTIFIQUE

THÉORIES ET GÉNÉRALITÉS

Sur l'origine des rayons β du thorium et de l'actinium. — **M. Levin.** — *Physikalische Zeitschrift*, 1er août 1906.

L'auteur s'est proposé de déterminer quels sont les produits du thorium et de l'actinium qui émettent des rayons β. Les radiations des produits de transformation du radium ont été complètement étudiées, et l'on a trouvé que le radium C, le dernier des produits de transformation rapide du radium, émet seul des rayons β pénétrants. Récemment, des expériences H.-W. Schmidt ont montré que le radium B, jusqu'alors consideré comme non radio-actif, émet des rayons β, mais de très faible pouvoir de pénétration. Dans son étude, l'auteur envisage seulement les rayons β de grand pouvoir de pénétration, c'est-à-dire de ceux qui, après avoir traversé une feuille d'aluminium de $0^{mm},1$ d'épaisseur, présentent une absorption de quelques centièmes seulement.

Les résultats de ces expériences très complètes montrent que l'actinium qui ne contient pas d'actinium X possède encore une activité α importante qui provient, non de l'actinium lui-même, mais du radio-actinium découvert par Hahn. L'actinium lui-même n'émet pas de radiations.

Les produits : thorium X, actinium X et émanation de l'actinium n'émettent que des rayons α. Parmi les nombreux produits du thorium et de l'actinium, les derniers des séries émettent seuls des rayons β. Tous les autres produits émettent des rayons α seuls ou bien n'émettent aucune radiation. Les rayons β qu'émet le thorium à l'état d'équilibre, proviennent exclusivement du thorium B ou du thorium C, et très vraisemblablement de ce dernier : les rayons β de l'actinium ne proviennent que de l'actinium B. Ce résultat montre clairement la similitude remarquable existant entre la forme de transformation du thorium et celle de l'actinium non seulement au point de vue du nombre et des propriétés chimiques de leurs produits, mais aussi au point de vue de la radiation émise.

Le Pr Rutherford a émis l'idée que l'émission des rayons β dans la dernière transformation rapide des éléments radio-actifs indique qu'un état d'équilibre est atteint dans la décomposition d'un atome. Aussi bien dans le cas du thorium que dans celui de l'actinium, l'émission d'une particule β et d'une particule α ne se produit que pendant la dernière transformation rapide et les atomes des corps résultants ont une stabilité permanente ou bien subissent seulement une très lente transformation. Dans le cas du radium, l'émission simultanée des particules α et β n'a lieu que pour le radium C, et le produit formé, le radium D, est relativement stable. Cette particularité de la forme de transformation des éléments radio-actifs est surprenante et doit avoir une certaine importance théorique.

B. L.

Sur l'absorption des rayons α du polonium. — **M. Levin.** — *Physikalische Zeitschrift*, 1er août 1906.

Dans leurs recherches sur les rayons α du radium, Bragg et Kleeman ont montré que les particules α se meuvent rectilignement et perdent leur énergie par ionisation pendant leur déplacement jusqu'à ce que leur vitesse devienne assez faible pour que leur pouvoir d'ionisation disparaisse. Ils ont trouvé, en outre, que les particules α ne possèdent de pouvoir d'ionisation qu'en deçà d'une certaine distance de leur source, et que cette distance est nettement définie. Des expériences sur les rayons α du radium, il résulte que les rayons α de chacun des quatre produits

du radium émettant ces rayons présentent la même distance d'ionisation dans l'air et la même vitesse initiale, distance et vitesse variables suivant le produit qui donne naissance aux rayons. Ce fait a été vérifié par Rutherford qui a montré que l'action photographique et la phosphorescence due aux rayons α cessent brusquement : les distances déterminées avec ces deux méthodes concordent bien avec celles qu'ont trouvées Bragg et Kleeman au moyen de la méthode électrique.

Les particules α d'une couche épaisse d'une substance radio-active provenant de profondenrs différentes, elles se meuvent évidemment avec des vitesses différentes après avoir quitté la couche. Pour cette raison, il est bon d'opérer sur des couches minces. Les dépôts actifs d'émanations radio-actives formant sur les corps une couche extrêmement mince, ils réalisent une excellente source pour ce genre d'expériences. La distance d'ionisation du radium C a été ainsi étudiée par Mac Clung au moyen d'un fil qui avait été exposé à l'émanation du radium : de même Hahn a récemment étudié de cette façon les distances relatives au thorium B et au thorium C. Comme l'avait indiqué Bragg, le polonium donnerait pour la même raison une excellente source de radiations, car il peut être déposé en couches très minces sur du bismuth.

L'auteur s'est proposé de mesurer la distance d'ionisation des rayons α du polonium dans l'air. Les rayons α de chaque produit radio-actif ayant une distance d'ionisation bien définie, la connaissance exacte de celle-ci présente de l'importance. L'auteur a employé pour cela une baguette de bismuth recouverte d'une couche mince de polonium (radiotellure).

Les expériences furent faites d'abord avec la méthode de scintillation. La baguette active fut placée au-dessous d'un écran au sulfate de zinc et l'on mesura la distance pour laquelle les scintillations disparaissent. Un nombre variable de feuilles d'aluminium de $0^{cm},0003$ d'épaisseur environ fut placé au-dessus de la baguette, et la distance mesurée. Les résultats sont indiqués par le tableau I.

D'après ces mesures, la distance d'ionisation dans l'air est de $3^{cm},78$. Si l'on porte en abscisses le nombre de feuilles et en ordonnées les distances, on obtient à peu près une droite coupant les ordonnées un peu plus haut que la valeur mesurée sans l'emploi de feuilles d'aluminium.

TABLEAU I

NOMBRE DE FEUILLES d'aluminium.	DISTANCE entre LA BAGUETTE ET L'ÉCRAN	HAUTEUR D'AIR EN CM. correspondant à une feuille d'aluminium.
0	3,78	»
1	3,29	0,49
2	2,78	0,50
3	2,30	0,49
4	1,84	0,48
5	1,35	0,49
6	0,82	0,49
7	0,32	0,50
		Moy. . 0,49

Les mesures furent faites à nouveau avec la méthode électrique. L'appareil employé était semblable à celui de Bragg et Kleeman. Un récipient métallique contenait la chambre d'ionisation et la baguette recouverte de polonium. La chambre consistait en deux plaques isolées placées à $0^{cm},5$ l'une de l'autre. La plaque supérieure était reliée à l'électromètre et la plaque inférieure, en toile métallique, à la batterie. La baguette recouverte de polonium était placée dans le trou d'un bloc de plomb et recouverte d'une plaque de plomb de $0^{cm},6$ d'épaisseur. Un trou circulaire de $0^{cm},4$ de diamètre traversait verticalement cette plaque. Le bloc de plomb était soutenu par un support de hauteur réglable. Le cône des rayons émanant du trou était si étroit que la section du faisceau ne recouvrait jamais entièrement la surface de chambre. L'ionisation dans celle-ci était mesurée pour différentes distances de la baguette.

L'ionisation dans l'air, d'abord déterminée, a présenté une courbe très analogue à celles obtenues par Bragg et Kleeman : le pouvoir d'ionisation des particules α croît d'une façon continue avec la distance, passe par un maximum bien défini, puis décroît rapidement. Le fait que cette courbe ne présente qu'un seul maximum montre que le polonium n'émet que des rayons α d'une seule espèce.

Le caractère général des courbes n'est pas modifié quand on fait franchir aux rayons une ou plusieurs couches d'aluminium. L'effet produit par les feuilles d'aluminium est simplement de déplacer la courbe d'une certaine quantité vers

l'axe des abscisses. Les tableaux II et III indiquent les distances entre la baguette et la plaque inférieure pour laquelle les particules α commencent à produire l'ionisation.

TABLEAU II

NOMBRE DE FEUILLES d'aluminium.	DISTANCE EN CM.	HAUTEUR D'AIR EN CM. correspondant à une feuille.
0	3,87	»
1	3,37	0,50
2	2,84	0,51
3	2,33	0,51
4	1,83	0,51

TABLEAU III

NOMBRE DE FEUILLES d'aluminium.	DISTANCE EN CM.	HAUTEUR D'AIR EN CM. correspondant à une feuille.
0	3,85	»
1	3,36	0,49
2	2,86	0,48
3	2,35	0,50
4	1,82	0,50

La moyenne de ces mesures donne, pour la valeur de la distance d'ionisation, 3^{cm},86. La moyenne des mesures faites au moyen de la méthode de scintillation donne 3,77 : la valeur extrapolée est donc 3,81.

Les résultats de ces expériences montrent que le polonium est une source homogène de rayons α et que les particules α possèdent la même vitesse initiale. La distance d'ionisation de 3^{cm},86 est un peu plus grande que celle des rayons α du radium lui-même (3^{cm},50) mais beaucoup plus petite que celle du radium C (7^{cm},06).

B. L.

Méthodes employées pour les mesures relatives aux rayons X et aux rayons provenant de corps radio-actifs. — **H. Bordier.** — *The Electrician*, 20 juillet 1906.

L'auteur indique les différentes méthodes de mesure employées dans les études relatives aux rayons X et aux différents rayons de corps radio-actifs. Il divise en deux groupes les méthodes énumérées, les méthodes ayant pour but la mesure qualitative des rayons, et les méthodes ayant pour but les mesures quantitatives des rayons. Les *mesures qualitatives* permettent d'évaluer le degré de pénétration des radiations. Les appareils principaux employés dans ces mesures sont les suivants :

1° L'électroscope de Hurmuzesku, avec lequel on mesure la distance à laquelle l'appareil est déchargé par les rayons.

2° Le spinteromètre de Beclère, avec lequel on mesure la longueur d'étincelle équivalente à la résistance intérieure du tube.

3° La méthode de Benoit, dans laquelle un disque d'argent de 0^{mm},11 d'épaisseur sert de terme de comparaison. On mesure la pénétration des rayons d'après l'épaisseur d'aluminium qui donne la même intensité sur un écran fluorescent.

4° Le milliampèremètre qui, intercalé dans le circuit du tube, indique la valeur du courant qui passe dans celui-ci.

5° Le radiomètre de Courtade, au moyen duquel on détermine le degré de fluorescence d'un écran de platinocyanure de baryum sous l'influence des rayons X, comparée avec celle produite par un spécimen de radium d'activité connue. L'appareil consiste en une feuille de plomb portant deux ouvertures couvertes chacune d'un écran fluorescent. Le radium qui sert d'étalon est placé derrière une ouverture. Le degré de fluorescence du second écran est égalisé avec celui de la fluorescence due à l'étalon par modification de la distance du tube ou du corps radio-actif étudié. La distance est une mesure de la puissance du tube et de la qualité des radiations. Cette méthode est sujette à une objection : c'est que l'intensité de fluorescence de tous les platinocyanures est sujette à de grandes variations quand ceux-ci sont exposés pendant un certain temps aux radiations du radium ou des rayons X.

6° Méthode de Contremoulins. Cette méthode, antérieure à celle de Courtade, est basée sur le même principe. Au lieu de radium, on emploie la lumière de l'acétylène pour illuminer l'écran fluorescent.

Parmi les *méthodes quantitatives*, on peut citer les suivantes :

1° Chromoradiomètre de Holzknecht. — Dans cet appareil, le réactif est contenu dans une petite capsule munie d'un couvercle en celluloïd.

La composition de ce réactif est tenue secrète : c'est probablement un mélange de différents sels fondus ensemble : le mélange présente la propriété de changer de couleur sous l'action des rayons X. La modification de couleur s'étend du jaune au vert et est plus ou moins marquée suivant que la quantité de rayons est plus ou moins grande. En accompagnant l'appareil d'une échelle de couleurs graduées du jaune verdâtre au vert cru, on peut avoir ainsi un étalon de comparaison pour apprécier la couleur de la capsule.

2° Méthode de Freund. — Le réactif est une solution à 2 % d'iodoforme dans du chloroforme. L'iodoforme CHI_3 est décomposé par les rayons X : l'iodoforme donne à la solution une couleur déterminée. Malheureusement le réactif est aussi sensible à l'action de la lumière : la solution n'est donc pas stable.

3° Radiomètre de Sabouraud et Noiré. — Cette méthode semble être la plus employée. Le réactif, platinocyanure de baryum, est étendu sur un petit disque de papier. Le sel brunit sous l'action des rayons X et passe du vert cru au brun pendant que la fluorescence décroît graduellement. Les inventeurs ont établi une série de couleurs étalons correspondant à celles que prend le réactif sous une action plus ou moins importante des rayons X.

4° Méthode de Kohler. — Dans cette méthode, la quantité de rayons X produits est mesurée par la variation de température dans le tube.

Celle-ci est indiquée par un thermomètre placé dans une dépression ménagée dans la paroi du tube. Il n'est pas prouvé du tout que la quantité de rayons X soit proportionnelle, d'une façon quelconque, à la température du tube.

5° Quantimètre de Kienbock. — L'appareil est basé sur l'action des rayons sur un papier photographique spécial. Un petit morceau de papier sensible, enfermé dans une enveloppe noire, est exposé aux rayons, puis lavé, développé et fixé à l'hyposulfite. La teinte du papier est alors comparée avec une échelle de teintes correspondant à des doses progressives des rayons X.

6° Méthode de Guilleminot-Courtade. — Cette méthode repose sur le principe du radiomètre de Courtade. Guilleminot emploie comme étalon un échantillon de radium dont la radio-activité a pour valeur 50000. Il place le tube à une distance de l'écran au platinocyanure de baryum telle que l'éclat des deux portions soit le même.

7° Radiophotomètre de Contremoulins. — Cet appareil est un totaliseur photographique et par conséquent ne peut pas être d'un emploi très étendu en pratique. L'auteur emploie deux échelles, consistant chacune en couches d'argent déposé électrolytiquement d'épaisseur graduellement croissante : l'une de ces échelles croît en progression arithmétique et l'autre, en progression géométrique. Ces échelles sont employées comme écrans placés devant une plaque de même sensibilité que la plaque radiographique. Les deux plaques sont ensuite développées dans des conditions identiques, jusqu'à ce que la coloration requise apparaisse. Le temps d'exposition aux rayons X et le temps de développement sont notés.

L'auteur propose une méthode basée sur la déshydratation des platinocyanures. Le platinocyanure de baryum est employé de préférence à cause de la facilité avec laquelle il tourne à la coloration brune. Le chromoradiomètre Bordier diffère des précédents en plusieurs points de détail. Le platinocyanure de baryum, suspendu dans une couche mince de collodion, est placé sur la pellicule elle-même. Les pastilles sont carrées. B. L.

GÉNÉRATION ET TRANSFORMATION

Sur les courants parasites *(fin)* (1). — **M. B. Field.** — *Electrical Review.*

La figure 2 représente le cas de deux conducteurs placés dans une encoche fermée, le courant passant dans un sens dans l'un et en sens opposé dans l'autre. L'effet dans chaque conducteur est le même que si l'on avait un seul conducteur placé dans une encoche ouverte dont le sommet serait en PQ, sauf que la tendance des lignes de force à passer à l'extérieur du sommet de l'encoche est neutralisée dans une grande mesure. Les courbes de la figure 2 montrent la distribution de courant et de la densité de pertes (2) en supposant que $f = 50$, $d/a = 0{,}71$ et $b = 1^{cm},875$, $3^{cm},75$ et $7^{cm},5$. L'auteur montre rapidement comment les calculs sont conduits.

Soit $\Delta_0 \sin pt$ la densité nominale de courant

(1) *Éclairage Électrique*, t. XLVIII, 18 avril 1906, p. 264.

(2) C'est-à-dire les pertes par centimètre cube en un point.

dans chaque conducteur, de sorte que $bd\Delta_0 \sin pt$ représente le courant total passant dans le conducteur. L'auteur étudie ce qui se passe dans le conducteur de gauche et considère la distance x mesurée de la partie inférieure du conducteur

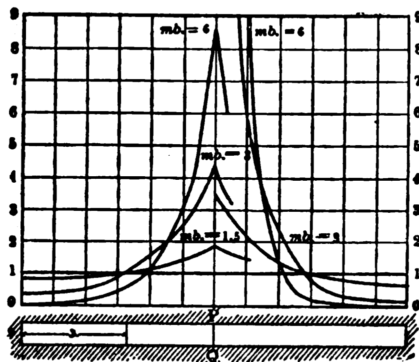


Fig. 2.

vers le centre de l'encoche. Dans la longueur de l'encoche, la densité de courant est modifiée. Soit Δ la valeur instantanée en x, et ρ la résistance spécifique en ohms-centimètre. Là où le conducteur émerge de l'encoche, le courant devient uniforme et le potentiel en tous les points du conducteur dans un plan parallèle aux plans des tôles est le même. Soient deux de ces plans, l'un à chaque extrémité de l'induit, placés juste assez en dehors pour que le courant soit devenu uniforme, et soient l la distance entre ce plan et v la différence de potentiel. Si l'on se souvient que le courant dans le conducteur placé dans l'encoche est lamellaire, la loi d'Ohm pour le courant en x est $v + V/l_1 = \Delta\rho l$, l_1 étant la longueur de l'encoche, augmentée d'une certaine quantité qui tient compte des franges existant aux extrémités. V et Δ sont des fonctions de x, mais v est indépendant : on a donc, en différenciant :

$$\frac{dV}{dx} = \frac{l}{l_1}\rho\frac{d\Delta}{dx}. \qquad (1)$$

Soit C le courant total dans le conducteur entre les limites $x = 0$ et $x = x$; l'induction en x est $(4\pi/10)(C/a)$. Le courant total dans le conducteur entre les limites $x = 0$ et $x = x + \delta x$ est $C + d.\Delta\delta x$, et l'induction au point $x + \delta x$ est :

$$\frac{4\pi}{10}\left(\frac{C + d.\Delta\delta x}{a}\right)$$

d étant l'épaisseur du conducteur.

On a donc l'équation suivante :

$$\frac{dB}{dx} = \frac{4\pi}{10}\cdot\frac{d}{a}\Delta. \qquad (2)$$

La force électromotrice V induite en x par centimètre de longueur par le flux principal est égale à $(dN/dt)10^{-8}$, N étant le nombre total de lignes de force que l'on considère comme entourant les tôles imaginaires en x.

$$dN/dx = B$$

et $$dV/dx = (dB/dt)\,10^{-8}. \qquad (3)$$

Les équations (1), (2) et (3) sont les équations fondamentales du problème : on peut éliminer V et B et l'on obtient :

$$\frac{d^2\Delta}{dx^2} = \frac{4\pi}{10}\cdot\frac{d}{a}\frac{l_1}{l}\cdot\frac{1}{\rho}\cdot 10^{-8}\cdot\frac{d\Delta}{dt}. \qquad (4)$$

On a, pour Δ, la valeur suivante :

$$\Delta = \delta_1\varepsilon^{mx}\sin\left(pt + mx + \beta_1 - \frac{\pi}{4}\right) + $$
$$+ \delta_2\varepsilon^{mx}\sin\left(pt - mx + \beta_2 - \frac{\pi}{4}\right), \qquad (5)$$

expression dans laquelle on a :

$$m^2 = \frac{2\pi p}{\rho}\cdot\frac{d}{a}\,10^{-9}.$$

Il est facile de voir que, quand il y a seulement un conducteur dans l'encoche, ou l'équivalent comme dans la figure 2, $\delta_1 = \delta_2$ et $\beta_1 = \beta_2$. Quand il y a plusieurs conducteurs dans l'encoche, traversés par des courants de même direction, les valeurs de δ_1 et β_1 diffèrent de celles de δ_2 et β_2. Les valeurs de $\delta_1\delta_2\beta_1\beta_2$ pour un conducteur quelconque sont déterminées par les deux conditions :

1° Que le courant total ou le courant intégral de la densité de courant dans la section droite du conducteur soit égal à $d.b\Delta_0 \sin pt$.

2° Que l'induction à la racine du conducteur, au point $x = 0$, soit égale à

$$\frac{4\pi}{10}(n - 1)\frac{d.b}{a}\Delta_0 \sin pt,$$

$(n - 1)$ étant le nombre de conducteurs au-dessous du conducteur en question.

Dans le cas du conducteur simple, on a :

$$\left.\begin{aligned} \delta_1 &= \frac{mb\Delta_0}{\sqrt{\text{ch}\,2mb - \cos 2mb}} \\ \text{et} \qquad \text{tang}\,\beta_1 &= \frac{\tanh mb}{\text{tang}\,mb}. \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

équations pour lesquelles sont tracées les courbes de la figure 2.

Le point important à déterminer est l'augmentation de pertes ohmiques dues à la distribution non uniforme, par rapport à la valeur des pertes relatives au cas d'une distribution uniforme. Pour cela, il suffit de considérer les valeurs maxima du courant à des profondeurs variables, sans s'occuper des relations de phase relatives. La valeur maxima de la densité de courant en x, déduite des équations 5 et 6, est la suivante :

$$\sqrt{2}mb\Delta_0\sqrt{\frac{\text{ch } 2mx + \cos 2mx}{\text{ch } 2mb - \cos 2mb}}. \qquad (7)$$

Les valeurs de la densité de courant en différents points du conducteur massif représentées sur la figure 2 correspondent aux cas où $mb = 6$, $mb = 3$ et $mb = 1{,}5$. En prenant $d/a = 0{,}61$ et $f = 50$, on a $m = 0{,}8$, et les valeurs indiquées correspondent à des profondeurs du conducteur de $7^{cm},5$, $3^{cm},75$ et $1^{cm},875$. Quand il y a plus d'un conducteur dans une encoche, le courant passant dans le même sens dans chacun d'eux, ces effets sont beaucoup amplifiés dans les conducteurs supérieurs.

La phase du courant n'est pas la même en tous les points du conducteur, mais une modification continue de phase se produit d'un bord du conducteur à l'autre. Par exemple, dans le cas où $mb = 3$, le courant au bord supérieur PQ est en avance sur le courant de la charge, tandis que le courant à la racine de l'encoche est de 127° en arrière, ce qui donne un décalage total de 172° entre les courants à l'orifice et à la racine de l'encoche. Dans la figure 2, les valeurs du carré de la densité du courant ont été tracées également, et montrent quel accroissement énorme la densité de pertes présente au bord extrême du conducteur. La hauteur moyenne de ces courbes de densité des pertes ou, ce qui revient au même, le rapport de la surface de la courbe actuelle de densité de pertes à celle de la courbe nominale de densité de pertes représente le coefficient de l'accroissement virtuel de résistance du conducteur, ou le rapport des pertes ohmiques actuelles aux pertes ohmiques nominales.

Ce rapport est la valeur du carré moyen de l'expression (7) prise sur la section droite, divisée par Δ_0^2. En appelant K cette valeur, on a

$$K = mb\,\frac{\text{sh } 2mb - \sin 2mb}{\text{ch } 2mb - \cos 2mb}. \qquad (8)$$

Cette valeur, déduite des équations relatives au cas du conducteur simple, s'appliquent seulement au conducteur du fond, quand il y a plusieurs conducteurs dans l'encoche, parcourus par le courant dans la même direction.

Dans le cas de plusieurs conducteurs placés l'un au-dessus de l'autre, traversés chacun par le même courant total, si on désigne celui du fond par l'indice 1, le deuxième par l'indice 2, etc., on peut montrer que l'on a :

$$K_n = mb\,\frac{4(n^2-n)(\text{ch } mb - \cos mb)(\text{sh } mb - \sin mb)}{\text{ch } 2mb - \cos mb} + \frac{\text{sh } 2mb + \sin 2mb}{\text{ch } 2mb - \cos mb}. \qquad (9)$$

On peut voir aussi que la constante par laquelle on doit multiplier les pertes ohmiques nominales par centimètre pour déterminer les pertes actuelles dans un conducteur donné, ou le coefficient d'augmentation de résistance, dépend entièrement de la profondeur du conducteur, de la fréquence, de la résistance spécifique, et du rapport d/a.

Les formules 8 et 9 ont été utilisées pour le calcul des courbes de la figure 3 correspondant à $n = 1$, $n = 2$, $n = 3$, $n = 4$ pour les cas où

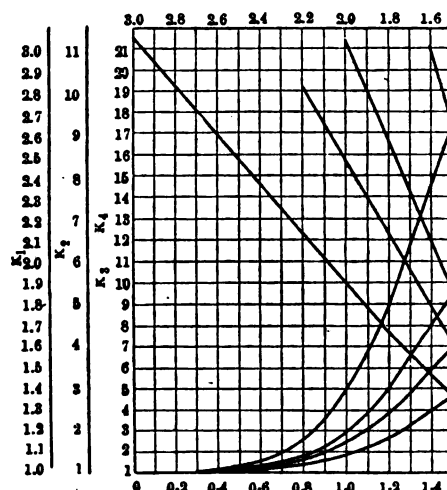


Fig. 3.

les encoches contiennent un, deux, trois, quatre conducteurs reliés en série, le courant passant dans le même sens dans chaque. Ces courbes indiquent (ordonnées) les valeurs du coefficient d'accroissement de résistance K_1, K_2, K_3 ou K_4 en fonction de mb : elles ont été tracées d'après les résultats obtenus antérieurement par l'auteur

dans une étude sur les courants de Foucault [1]. Les courbes se rapportent seulement à la partie des conducteurs placée dans l'encoche et montrent la valeur de l'accroissement des pertes par rapport à la loi d'Ohm. Comme exemple indiquant l'emploi de ces courbes, l'auteur envisage le cas d'un enroulement à quatre couches, la profondeur de chaque conducteur étant d'un centimètre, et la fréquence de 50 périodes par seconde. Soit $d/a = 0{,}61$; $m = 0{,}8$. En se rapportant aux valeurs de K qui correspondent à $mb = 0{,}8$ pour le premier, le deuxième, le troisième et le quatrième conducteur, on obtient les valeurs 1,04, 1,3, 1,85 et 2,6 : on voit donc que les pertes nominales sont augmentées de 4 % dans le conducteur le plus bas et de 260 % dans le conducteur supérieur.

Quand on trouve dans une machine que les pertes par courants parasites surpassent considérablement les pertes nominales, on considère que les unes augmentent et que les autres diminuent avec la section de cuivre, et l'on est amené à étudier si une diminution du volume de cuivre employé ne conduirait pas à une amélioration de rendement. Soit q le rapport de la longueur active du conducteur à la longueur d'un demi-tour. On laisse invariables a, d, C et toutes les autres dimensions et on modifie seulement la valeur de b. Soit $m = 1$. La valeur des pertes nominales par centimètre de longueur est P/b, P étant donné par l'expression $\rho C^2/d$, et les pertes actuelles moyennes par centimètre ont pour valeur

$$(P/b)\,[qK + (1 - q)],$$

K étant le coefficient qui correspond à la valeur de mb. Si l'on porte en ordonnées les valeurs de P/b et en abscisses les valeurs de b (ou de mb pour $m = 1$), on obtient une hyperbole rectangulaire. Si l'on multiplie chaque valeur de P/b par la valeur correspondante de $[qK + (1 - q)]$, on trouve les pertes actuelles pour chaque valeur de b, m étant égal à l'unité Cette courbe présente une valeur minima, c'est-à-dire qu'il existe une valeur critique de b donnant le minimum de pertes, et cette valeur critique est évidemment indépendante de la valeur de C. Si l'on double b, les pertes nominales sont diminuées de moitié, mais si, en même temps, on diminue m de moitié, le coefficient K reste invariable, et la courbe précédente s'applique également au cas où $m = 0{,}5$ si, pour un point quelconque donné, on multiplie par 2 la valeur de l'abscisse et par 1/2 la valeur de l'ordonnée. Si l'on considère que les abscisses représentent les valeurs de mb au lieu de b, on n'a pas à changer l'échelle.

On observe que, pour toutes les valeurs de m, le point minimum de la courbe est atteint pour la même valeur de mb. La figure 4 montre ces courbes tracées pour $n = 1$, $n = 2$, $n = 3$, $n = 4$,

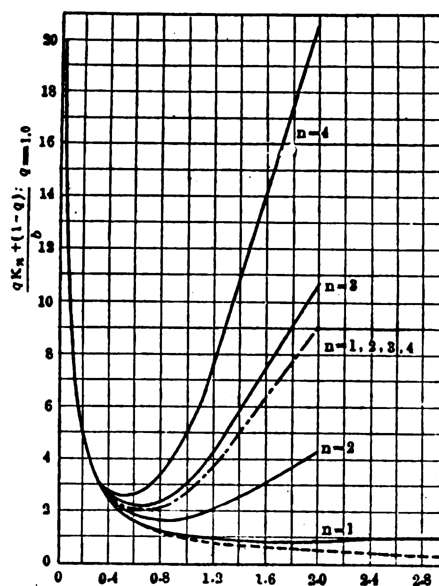


Fig. 4.

$q = 1$. La courbe en trait interrompu indique les pertes nominales ; la courbe en traits-points indique la courbe correspondant à la moyenne de $n = 1, 2, 3, 4$. En ordonnées sont portées les valeurs relatives de $qK_n + (1 - q)$; en abscisses sont portées les valeurs absolues de mb.

Ces courbes indiquent les valeurs relatives des pertes quand m est supposé constant et que b varie ; quand m varie, l'échelle des ordonnées varie proportionnellement. On voit sur les courbes la valeur de mb pour laquelle le minimum des pertes a toujours lieu. Sur la figure 4 sont aussi représentées les valeurs relatives des pertes nominales, et la valeur moyenne des quatre courbes pour $n = 1$, 2, 3 et 4. On a supposé $q = 1$, c'est-à-dire que la longueur totale du conducteur est active : le minimum des pertes pour le conducteur le plus bas est obtenu quand

(1) *Éclairage Électrique*, XLIII, 22 avril 1905, p. 105.

$mb = 1,4$, pour le second conducteur quand $mb = 0,8$, etc. Si l'on prend $f = 50$ et $d/a = 0,61$, de façon que $m = 0,8$, les profondeurs critiques de conducteur sont $1^{cm},75$, un centimètre, $0^{cm},8$ et $0^{cm},7$ pour le 1er, le 2e, le 3e et le 4e conducteur. Toute profondeur additionnelle entraîne un accroissement de pertes et une dépense inutile de cuivre. Donc, si cette profondeur critique est dépassée, un accroissement de la résistance spécifique diminuera la valeur des pertes et le rendement de la machine s'améliorera alors que l'élévation de température augmentera.

La profondeur critique dans le cas de quatre bobines a été déterminée dans le cas où tous les conducteurs ont la même section, mais il est facile de voir qu'en graduant la section des conducteurs dans les différentes couches, on peut obtenir un résultat meilleur : il faut faire passer un peu de cuivre des couches supérieures dans les couches inférieures.

La détermination des dimensions des encoches et des conducteurs repose, naturellement, sur d'autres facteurs importants qui doivent être pris en considération. Par exemple, la chaleur engendrée dans la portion active du conducteur est, en grande partie, amenée aux connexions terminales où elle est dissipée par ventilation et par radiation. Un conducteur de grande section conduit mieux la chaleur et tend à réduire la température maxima dans la portion active.

Il a été question jusqu'ici de l'effet lamellaire dans les machines à courant alternatif seulement. Si l'on considère, toutefois, que le courant passant dans les conducteurs induits d'une génératrice à courant continu est, en réalité, un courant alternatif, on voit que les résultats trouvés s'appliquent aussi, avec quelques modifications, aux machines à courant continu. Si l'on considère un conducteur d'un induit de machine à courant continu, on voit que le courant a une certaine direction quand le conducteur passe sous un pôle nord, et une direction opposée quand le conducteur passe sous un pôle sud. Le changement de direction s'effectue pendant la période de commutation. La valeur du courant à un instant quelconque pendant cette période est à peu près inconnue, mais la période est très courte. Si l'on suppose que le courant dans chaque conducteur a une forme rectangulaire, avec une valeur C positive ou négative, et une période $1/f$, on peut faire quelques calculs. Prenant C comme unité, on a, à chaque instant, comme valeur du courant :

$$\frac{4}{\pi}\left(\sin pt + \frac{1}{3}\sin 3pt + \frac{1}{5}\sin 5pt + \cdots\right),$$

où $p = 2\pi f$. On a ainsi un grand nombre d'ondes sinusoïdales de différentes fréquences passant dans chaque conducteur et on peut calculer les pertes dues à chacune d'elles comme si elle existait séparément. Par exemple, on peut envisager le cas d'une machine hexapolaire, à 500 tours par minute : f est égal à 25 périodes par seconde. On doit donc calculer la valeur de mb pour $f = 25$, 75, 125, etc., et, si l'on appelle ${}_1K_n$, ${}_3K_n$, ${}_5K_n$, etc., les valeurs correspondantes de K_n, le suffixe indiquant la position du conducteur dans l'encoche et le préfixe le numéro d'ordre dans la série de Fourier, le coefficient d'accroissement de résistance pour le n^e conducteur est donné par l'expression

$$\frac{8}{\pi^2}\left[{}_1K_n + \frac{1}{9}({}_3K_n) + \frac{1}{25}({}_5K_n) + \cdots\right].$$

En général, les valeurs de K pour les conducteurs massifs des machines à courant continu sont plus grandes que celles relatives aux conducteurs de même profondeur des machines à courant alternatif tournant à la même vitesse et possédant le même nombre de pôles. Cela tient à ce que, dans la machine à courant continu, le courant est surtout composé de termes de plus grande fréquence et l'isolement occupe moins de place, par suite du voltage moins élevé. La valeur de K de la portion active du conducteur supérieur, calculée d'après les dix-sept premiers termes de la série est 2,5, f étant supposée égale à 25 périodes par seconde. La valeur de K pour le conducteur inférieur est 1,26, et, pour tout l'enroulement, 1,44, si l'on suppose $q = 0,5$.

Malheureusement, cette série n'est pas très rapidement convergente. Les valeurs de K pour les termes de plus haute fréquence peuvent être calculées au moyen de l'expression

$$mb\left[2(n^2 - n) + 1\right].$$

Dans l'induit d'une commutatrice, l'effet est beaucoup plus prononcé, car les termes de haute fréquence sont plus prédominants. R. R.

Diagramme du cercle du moteur d'induction monophasé. — **A.-S. Mac Allister.** — *Electrical World*, 30 juin 1906.

Le lieu géométrique des courants primaire et

secondaire d'un moteur d'induction polyphasé et la détermination de ce lieu sont connus. L'auteur se propose d'indiquer une méthode permettant d'obtenir simplement un diagramme semblable pour le moteur d'induction monophasé.

La différence principale entre un moteur d'induction monophasé et un moteur d'induction polyphasé réside dans le caractère des champs magnétiques de deux machines. A la vitesse du synchronisme, chacune d'elles possède un champ tournant réel. A l'arrêt, le champ magnétique d'un moteur polyphasé tourne synchroniquement et a une intensité plus ou moins constante : le champ d'un moteur monophasé est, au contraire, alternatif dans une direction unique.

Si, quand le rotor d'un moteur d'induction polyphasé est immobile, on ouvre un des circuits primaires de telle façon que le courant passe seulement dans deux conducteurs de la machine, on voit que les voltampères totaux absorbés par la machine diminuent d'environ moitié de la valeur précédente, le facteur de puissance restant pratiquement le même. La force magnétomotrice du courant dans chaque enroulement d'un moteur diphasé, quand le rotor est stationnaire, produit un flux qui (pour une réluctance constante du noyau) agit comme si le flux dû au courant dans l'autre enroulement n'existait pas. Les courants produits dans le secondaire par deux flux alternatifs en quadrature ne doivent pas interférer entre eux, de sorte que le courant dans chaque enroulement primaire circule comme si l'autre courant primaire n'existait pas. Ainsi le courant « monophasé équivalent » de démarrage d'un moteur diphasé est double de celui du même moteur quand un seul enroulement est employé : le facteur de puissance est le même dans les deux cas. La théorie et l'expérience montrent que le courant « monophasé équivalent » de démarrage d'un moteur triphasé est aussi égal au double du courant qui passe dans deux conducteurs quand le troisième est interrompu.

Si, quand le rotor d'un moteur d'induction polyphasé tourne synchroniquement, on ouvre un des circuits primaires, on trouve que le courant passant dans les autres conducteurs augmente et que les volt-ampères totaux absorbés par la machine restent pratiquement constants, le facteur de puissance restant pratiquement le même (la composante wattée du courant monophasé équivalent croît un peu, et la composante déwattée décroît légèrement). L'action de la machine à la vitesse du synchronisme doit être attribuée à l'existence d'un champ magnétique tournant d'intensité pratiquement constante qui exige une composante déterminée du courant en phase avec la tension pour couvrir les pertes, et une autre composante en quadrature avec la tension pour fournir la puissance magnétisante.

Quand le rotor d'un moteur polyphasé tourne au synchronisme, le courant secondaire a une valeur négligeable. Dans le moteur monophasé, le courant secondaire à la vitesse du synchronisme a une valeur telle que sa force magnétomotrice produise un flux égal au flux principal et en quadrature avec celui-ci dans l'espace et dans le temps. La valeur du flux principal est déterminée par la f. é. m. primaire comme dans tout transformateur ; la valeur du flux qui est en quadrature avec lui dans l'espace et dans le temps dépend du « flux de transformateur » et de la vitesse du rotor ; les deux flux sont égaux en valeur efficace au synchronisme, et, aux autres vitesses, le « flux de vitesse » est égal au « flux de transformateur » multiplié par la vitesse, la vitesse synchrone étant prise pour unité. Ainsi la composante du courant secondaire varie avec la vitesse et est nulle à l'arrêt.

Les circuits d'un moteur d'induction monophasé peuvent être représentés d'une façon suffisamment exacte, en ce qui concerne les résistances primaires et secondaires et les réactances de dispersion, par le schéma de la figure 1 : le

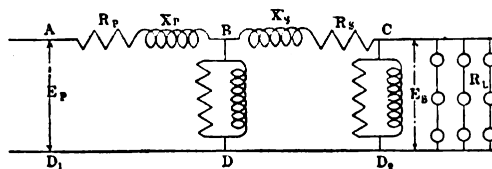


Fig. 1.

« champ de transformateur » est figuré entre les points B et D, le « champ de vitesse » entre les points C et D_2, et la charge en R_L. Le courant correspondant à la charge et celui qui produit le « flux de vitesse » passent dans les bobines primaires et secondaires, tandis que le courant correspondant au « flux de transformateur » traverse seulement la bobine primaire. Quand le circuit de charge est ouvert, c'est-à-dire à la vi-

tesse de synchronisme, les courants correspondant au « flux de vitesse » et au « flux de transformateur » sont pratiquement égaux en valeur. Quand la résistance de circuit de charge est nulle, c'est-à-dire à l'arrêt, le courant correspondant au « flux de vitesse » est nul et le courant passant dans les bobines de la machine agit comme si le circuit du « flux de vitesse » n'existait pas. Il y a lieu de noter spécialement que la diminution dans le courant du « flux de vitesse » au-dessous de la valeur du courant du « flux de transformateur » doit être attribuée à la variation de la vitesse du rotor à partir du synchronisme et non à la chute de voltage dans l'enroulement secondaire, produite par le courant correspondant à la charge. Le courant correspondant à la « charge secondaire » est en quadrature dans l'espace avec le courant du « flux de vitesse » et les deux courants n'interfèrent jamais entre eux. Ce qui précède se rapporte exclusivement au courant dont la force magnétomotrice produit le « flux de vitesse », courant qui, par suite de son décalage dans l'espace, ne peut jamais réagir sur le « flux de transformateur ». Le secondaire est aussi parcouru par une autre composante de courant s'ajoutant au courant qui correspond à la charge. La position de cette composante dans le temps et dans l'espace est telle que sa force magnétomotrice tende directement à diminuer le « flux de transformateur »: elle agit uniquement comme courant secondaire déwatté. C'est cette dernière composante du courant secondaire qui est représentée sur le schéma de la figure 1. Cette composante est à peu près, vis-à-vis du courant du « flux de vitesse » dans le rapport de la vitesse du rotor à la vitesse de synchronisme. La différence de potentiel aux bornes du circuit du « flux de vitesse » de la figure 1 est approximativement égale à celle aux bornes du circuit du « flux de transformateur » multiplié par le carré de la vitesse, la vitesse de synchronisme étant prise pour unité. L'auteur reviendra d'une façon plus détaillée sur ces faits dans une prochaine étude.

Quoiqu'il soit possible de construire les lieux géométriques des courants primaire et secondaire en partant des circuits représentés schématiquement sur la figure 1, le problème est beaucoup simplifié si l'on s'appuie sur la représentation schématique de la figure Le2. diagramme des courants pour les circuits de la figure 2 est représenté par la figure 3, où MN est la puissance et ON la composante déwattée du courant primaire à la vitesse du synchronisme sous charge,

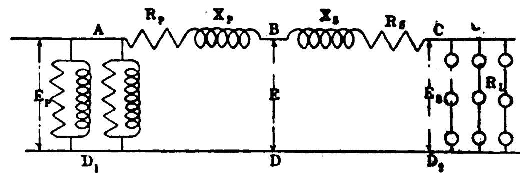


Fig. 2.

FI la composante wattée et IM la composante déwattée du courant primaire à l'arrêt. La courbe OPFK est un arc de cercle ayant son centre sur

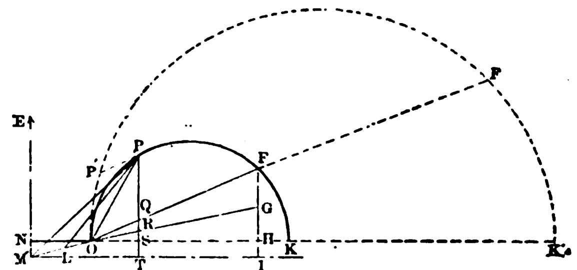


Fig. 3.

la ligne ON prolongée. OL est le courant du « flux de vitesse » (supposé constant dans le diagramme) ; LM est le courant du « flux de transformateur » et OM est le courant primaire total au synchronisme.

La ligne FI, perpendiculaire à MTI, représente les pertes totales de la machine à l'arrêt ; HI indique les pertes dites « constantes » et FH la somme des pertes « additives » dans le cuivre primaire et secondaire. Si GH représente les pertes dans le cuivre primaire, FG représente les pertes dans le cuivre secondaire. En joignant F et G à O et en menant, d'un point P quelconque de l'arc de cercle OPFK une perpendiculaire à la ligne MI, on peut tirer directement les valeurs suivantes du diagramme :

OP est la composante « additive » du courant primaire.

OP est aussi la composante « additive » du courant secondaire.

PL est le courant secondaire total.

PM est le courant primaire total.

Cos EMP est le facteur de puissance.

PT/PM est le facteur de puissance.

ST représente les pertes « constantes » de la machine.

RS représente les pertes « additives » dans le cuivre primaire.

RT représente les pertes totales primaires (y compris les pertes du courant d'excitation du « flux de vitesse » dans le secondaire).

QR représente les « pertes additives » dans le cuivre secondaire.

QT représente les pertes totales de la machine.

PT est la puissance absorbée.

QP est la puissance restituée.

QP/PT est le rendement.

PR est la puissance totale absorbée par le secondaire (non comprises les pertes du courant d'excitation du « flux de vitesse »).

$(PQ/PR)^{1/2}$ représente la vitesse, le synchronisme étant pris pour unité.

$PQ \times PR)^{1/2}$ représente le couple en watts synchrones.

La représentation de chacune de ces grandeurs, sauf celle de la vitesse et du couple, est facilement compréhensible si l'on compare les figures 2 et 3. La représentation de la vitesse et du couple sont très faciles à déterminer de la façon suivante. Le « flux de vitesse » est, dans des conditions quelconques, égal au « flux de transformateur » multiplié par la vitesse. Or le couple est proportionnel au produit du « flux de vitesse » par la composante du courant secondaire en phase avec lui et qui coupe le noyau à la même position le long de l'entrefer que celle occupée par le « flux de vitesse ». Cette composante du courant secondaire est en quadrature dans le temps avec le « flux de transformateur » et a une valeur telle que son produit par la f. é. m. primaire (pour une machine avec le rapport unité) représente la puissance totale reçue par le secondaire, exception faite des pertes dues au courant d'excitation secondaire. Une courte étude montre que, si le « flux de vitesse » est égal au « flux de transformateur », le couple en watts synchrones est égal à la puissance absorbée au secondaire (exception faite des pertes d'excitation. Puisque le « flux de vitesse » varie directement avec la vitesse, on voit que le couple D est égal à la puissance absorbée au secondaire W_s, multipliée par la vitesse S. Ainsi l'on a :

$$D = SW_s. \quad (1)$$

Le couple est aussi égal à la puissance produite W_o divisée par la vitesse, et l'on peut écrire

$$D = W_o/S \quad (2)$$

on en tire : $S = (W_o/W_s)^{1/2}$.

Donc on voit que, dans un moteur d'induction monophasé, la vitesse est égale à la racine carrée du rendement secondaire. Quand la vitesse varie seulement de quelques centièmes du synchronisme, le glissement est égal à la moitié des pertes secondaires exprimées en pour cent, comme l'a indiqué Behrend. Ainsi, à la vitesse de 0,98, le rendement secondaire est 0,9604 ; le glissement est 0,02 ; les pertes sont 0,0396. Il est intéressant de noter en comparaison que, dans un moteur d'induction polyphasé, la vitesse est directement égale au rendement secondaire.

En combinant les équations (1) et (3), on trouve que la valeur du couple est donnée par l'équation suivante

$$D = (W_o \times W_s)^{1/2}. \quad (4)$$

On voit donc que le couple est égal à

$$(PQ \times PR)^{1/2}$$

sur la figure 3.

Il y a lieu de noter que les valeurs de la vitesse et du couple, ainsi déterminées, ne sont pas affectées par la substitution des circuits modifiés de la figure 2 aux circuits plus exacts de la figure 1. La méthode indiquée donne des résultats corrects au synchronisme et à l'arrêt ; aux vitesses intermédiaires, les erreurs légères introduites ont des valeurs positives et négatives et tendent à se compenser dans les résultats finaux.

Aux vitesses inférieures au synchronisme, il y a une légère diminution du courant du « flux de transformateur » et une forte diminution dans le courant du « flux de vitesse », tandis que, dans la figure 2, on a supposé que les deux courants sont constants : par suite, le facteur de puissance réel du moteur monophasé a une valeur un peu supérieure à celle qu'indique la figure 3. La différence n'est appréciable que dans les cas où le courant au synchronisme à vide est grand en comparaison du courant de démarrage. Ainsi le diagramme de la figure 3 donne des résultats exacts en ce qui concerne le facteur de puissance pour des moteurs puissants, mais, pour les petits moteurs, les valeurs du facteur de puissance doivent être meilleures que celles indiquées par le diagramme.

Il est intéressant de comparer le fonctionnement d'un moteur polyphasé donné, alimenté normalement, avec le fonctionnement de la même machine employée comme moteur monophasé.

En se servant des grandeurs « monophasées équivalentes », le courant de démarrage polyphasé du moteur dont le diagramme du cercle monophasé est représenté par l'arc OPFK de la figure 3, est donné par la ligne MFF′ (incomplètement tracée) ayant une longueur égale au double de celle de la droite MF (non tracée). Le lieu du courant polyphasé est un cercle passant par F et O et dont le centre est sur la droite ON polongée. Si la machine fonctionne comme moteur monophasé avec un certain courant primaire, tel que celui représenté par MP sur la figure 3, la puissance produite est PQ, comme cela a été indiqué. Si l'on doit obtenir la même puissance avec la machine fonctionnant en polyphasé, la valeur « monophasée équivalente » du courant polyphasé est MP′ (non tracé), la droite PP′ étant pratiquement parallèle à OF : donc les voltampères absorbés comme machine monophasée ont une valeur plus grande que ceux absorbés comme machine polyphasée dans le rapport de MP à MP′ et le facteur de puissance est inférieur dans le rapport de cos EMP à cos EMP′ : les pertes sont plus grandes.

Quoique le diagramme du cercle développé ci-dessus soit applicable à tous les types de moteurs d'induction monophasés, la comparaison qui précède se rapporte exclusivement aux moteurs polyphasés et aux mêmes moteurs employés sur circuits monophasés. La comparaison entre un moteur monophasé et un moteur polyphasé n'est pas tout à fait aussi défavorable au premier quand chaque machine est établie, au primaire, pour ses conditions particulières d'alimentation. Quand un moteur polyphasé est employé comme machine monophasée, une portion seulement du cuivre primaire est utilisée : il est évident que l'on peut obtenir une plus grande puissance en modifiant les connexions des bobines de façon à utiliser tout le cuivre.

Avec un moteur d'induction muni de bobines uniformément réparties, quand le fer est soumis à la même induction et à la même fréquence, et quand la même densité de courant est employée dans le cuivre, la puissance varie beaucoup avec les groupements des bobines. Ainsi, l'on peut montrer qu'avec un tel moteur les volt-ampères absorbés peuvent être représentés proportionnellement par la périphérie d'un polygone ayant un nombre de côtés égal au nombre de groupes par paire de pôles : le cercle circonscrit à ce polygone représente les volt-ampères absorbés pour un nombre infini de groupes, et le double du diamètre représente les volt-ampères absorbés par le moteur monophasé. En donnant au diamètre du cercle circonscrit une valeur arbitraire d'unité, les puissances apparentes absorbées par la machine pour différents groupements de bobines sont les suivantes :

Nombre de groupes.	Type de machine.	Voltampères absorbés.
—	—	—
2	Monophasée.	2 000
3	Triphasée.	2 598
4	Tétraphasée (diphasée).	2 828
6	Hexaphasée (triphasée).	3 000

Les bobines du moteur d'induction diphasé commercial étant groupées comme celles d'une machine tétraphasée, et les bobines du moteur d'induction triphasé étant disposées comme celles d'une machine hexaphasée, un moteur triphasé absorbe une puissance 1,061 fois plus grande qu'un moteur diphasé (en supposant une valeur égale des pertes), tandis que la puissance absorbée par un moteur monophasé est 0,707 fois celle d'une machine monophasée. La dicussion de ces relations sortirait du cadre de cette étude.

R. R.

***Sur les commutatrices shunt ou compound pour le service de traction.* — W.-L. Waters.** — *The Electrician*, 13 juin 1906.

Dans les circuits à courant continu, il est souvent avantageux d'employer un système autorégulateur dans de larges limites au point de vue de la tension. C'est particulièrement le cas quand la charge varie fréquemment, et, dans ce cas, on emploie des génératrices compound. L'enroulement série du générateur tend à élever la différence de potentiel aux bornes de la machine quand la charge augmente. Cet accroissement compense l'augmentation de chute de tension dans les feeders et les câbles principaux de distribution. En modifiant les enroulements série du générateur, on peut varier à volonté la tendance de la machine à augmenter de tension avec la charge.

Dans une commutatrice, le rapport des différences de potentiel aux bornes alternatives et continues de la machine est approximativement constant et indépendant de la charge ou de l'excitation : le seul moyen pour modifier la différence de potentiel aux bornes à courant continu

est donc de modifier la différence de potentiel aux bornes à courant alternatif. Si la différence de potentiel continue doit croître avec la charge, la différence de potentiel alternative doit croître de la même manière. Si l'on suppose que la tension à l'extrémité des feeders à courant alternatif est approximativement constante et que le circuit compris entre le générateur et la commutatrice contient suffisamment d'inductance, on peut élever ou abaisser la différence de potentiel à l'extrémité de la ligne alternative desservant la commutatrice en introduisant dans le système un courant décalé en avant ou en arrière. On peut introduire ce courant décalé en avant ou en arrière en surexcitant ou en sous-excitant la commutatrice. Or, si l'on place des enroulements série sur les inducteurs de la commutatrice, l'excitation de la machine croît avec la charge, et un courant décalé en avant, approximativement proportionnel à la charge, est introduit dans le système à courant alternatif. Ce courant tend à élever la différence de potentiel alternative agissante, et, par suite, la différence de potentiel continue recueillie. Avec cet artifice, on peut compounder une commutatrice de la même manière qu'une dynamo génératrice à courant continu.

On réalise donc ainsi un système de réglage automatique de la tension avec la charge. Un tel système est évidemment très commode et très utile. Malheureusement il présente plusieurs inconvénients en pratique : un enroulement série doit être placé sur les inducteurs ; des bobines de réactance artificielles doivent toujours être insérées, en pratique, dans la ligne à courant alternatif pour amener la réactance de celle-ci à la valeur nécessaire ; et il en résulte une complication. Ce système entraîne donc des complications et des dépenses, et une perte de rendement. Une commutatrice compound coûte de 7 à 8 % plus cher qu'une commutatrice shunt. Les bobines de réactance employées coûtent environ 5 % du prix de la commutatrice. Le rendement du système est abaissé de 1 à 2 % probablement. Enfin le système est plus compliqué et d'une surveillance plus difficile. Un enroulement série est toujours une source de danger sur une commutatrice à cause de la possibilité d'inversion. Quand on démarre la machine, on peut court-circuiter ces enroulements pour éviter tout danger, mais si l'électricien manœuvre l'interrupteur de court-circuit à un moment quelconque, il peut se produire des troubles. Si, pendant que les bobines série sont en service, le courant alternatif est coupé pour une cause quelconque et si la machine reste connectée au courant continu, l'action des bobines série est inversée et la machine s'emballe : il faut prévoir alors un dispositif de sécurité limitant la vitesse.

Le compoundage obtenu par l'emploi d'enroulements série et de bobines de réactance n'est pas aussi satisfaisant que l'on pouvait s'y attendre. Evidemment l'application la plus utile de ce système est de surcompounder les commutatrices de faibles sous-stations, pour compenser les fortes chutes de tension dans les feeders au cas où la charge varie violemment. Les résultats, dans ce cas, ne sont pas toujours satisfaisants. Pour que la commutatrice soit surcompoundée et que la différence de potentiel continue varie, il faut que le flux magnétique dans les inducteurs varie : or les inducteurs sont toujours en acier massif, et le flux ne peut pas varier brusquement ; il y a souvent un décalage de temps considérable entre la variation de voltage et la variation de charge qui lui donne naissance. Le résultat est que, quand la charge varie brusquement, les indications du voltmètre varient de 500 à 650 volts sans que la différence de potentiel ait aucune relation apparente avec la charge de la machine. Toutefois, si la machine est simplement compound au lieu d'être surcompound, le résultat est plus satisfaisant, car la tendance naturelle des pôles massifs est de maintenir le flux et la tension constante.

Mais généralement, les sous-stations de faible puissance sont alimentées par des usines génératrices de puissance relativement faible ; quand la charge varie, l'un des principaux effets est une variation de vitesse des machines génératrices, et, par suite, de la vitesse des commutatrices et de la tension alternative. L'effet de cette variation de vitesse masque souvent d'une façon complète tous les résultats de l'excitation compound.

En outre, cette méthode de compoundage est souvent nuisible. Il faut que le dimensionnement des enroulements série et des bobines de réactance soit très soigneusement déterminé. Si l'on transporte une commutatrice d'une sous-station à une autre, ou si les conditions de la ligne sont changées, il faut ajuster à nouveau les enroule-

ments et les bobines. Si d'autres commutatrices compound sont établies dans la même sous-station, il faut ajuster chacune d'elles pour que la charge se répartisse convenablement. On peut employer des connexions d'égalisation, mais les résultats sont rarement satisfaisants. Les différentes caractéristiques des commutatrices et la variation dans la résistance de contact des balais et de la température des machines rendent le réglage très difficile. Quand on a affaire à des commutatrices shunt, si la charge ne se répartit pas convenablement, on peut agir sur les rhéostats d'excitation pour obtenir une répartition convenable : d'ailleurs les commutatrices shunt, comme les génératrices shunt, ont une tendance naturelle beaucoup plus grande à se partager convenablement la charge que les machines compound. Avec le compoundage, le facteur de puissance du système de commutatrices varie, et varie même souvent dans de larges limites, avec la charge. Les commutatrices shunt, au contraire, tendent à maintenir le facteur de puissance constant à toutes les charges. En tous cas, on peut régler la valeur du facteur de puissance en manœuvrant le rhéostat de champ, sans altérer aucunement le réglage.

Le résultat de toutes les complications et de tous les désavantages d'une commutatrice compound à bobines de réactance est que, peu après la mise en service, on met hors circuit ces bobines et les enroulements série, et l'on se sert de la machine avec l'excitation shunt seule. De cette façon, la machine est plus facile à régler et ne peut pas causer de troubles.

Probablement le meilleur système général est d'avoir des commutatrices shunt, des transformateurs standard et pas de bobine de réactance. Généralement on surexcite un peu la commutatrice pour relever le facteur de puissance en tout temps, et on la laisse fonctionner sans toucher au rhéostat, sauf dans le cas de répartition de la charge.

Dans le cas d'une sous-station importante, la chute de tension dans les feeders est faible et les fluctuations de charge sont peu importantes, de sorte que la tension reste à peu près constante en tout temps. La seule manœuvre de l'électricien consiste à mettre en service ou hors service une commutatrice supplémentaire, suivant la charge, et de vérifier que chaque machine prend à peu près sa part de la charge totale.

Dans le cas de sous-stations de faible puissance, la tension varie avec la charge à cause de la chute de tension dans les feeders. La tension du côté continu doit être élevée aux faibles charges et basse aux fortes charges. Pour une ligne desservie par plusieurs sous-stations, c'est une excellente condition. Quand la charge est faible, cela prouve que presque toute la charge est supportée par les autres sous-stations : il faut donc que le voltage soit élevé à la station peu chargée et bas aux stations chargées pour que la station peu chargée vienne au secours des autres et prenne une part plus importante de la charge. Il y a lieu d'exciter les commutatrices jusqu'à ce que le facteur de puissance devienne égal à l'unité à toutes les charges : dans ces conditions, la chute de tension dans les feeders tend automatiquement à égaliser la charge entre les différentes sous-stations.

Ainsi, avec des commutatrices shunt, au lieu de commutatrices compound avec bobines de réactance, les résultats sont : une plus grande économie, un meilleur rendement, une moins grande complication, moins de chances de troubles ou de difficultés d'exploitation, un meilleur fonctionnement aussi bien dans les sous-stations importantes que dans les sous-stations de faible puissance. On peut dire que la tendance est de ne construire que la commutatrice shunt, qui deviendra le type standard pour la traction sur voies ferrées, et que la commutatrice compound sera considérée bientôt comme un type spécial de générateur applicable seulement dans quelques cas très particuliers.

R. R.

TRANSMISSION & DISTRIBUTION

Ligne de transmission et sous-station à 60 000 volts. — *Street Railway*, 17 juillet 1906.

Une partie de l'énergie électrique produite aux chutes de Niagara est transmise, sous une tension de 60 000 volts, à la ville de Syracuse, pour l'alimentation du réseau de traction électrique. Cette ligne de transmission de 266 kilomètres de longueur marque une étape dans le développement des installations électriques et présente un incontestable intérêt.

L'énergie électrique transmise à Syracuse est utilisée par la Cie du Syracuse Rapid Transit, exploitant 130 kilomètres de voies et absorbant

36000 kilowatts-heure par jour pour assurer un service de 110 automotrices par heure à certains moments de la journée. Avant l'installation de l'usine de Niagara Falls, l'énergie électrique était produite par une ancienne usine génératrice à courant continu qui était extrêmement surchargée : cette usine sert actuellement de réserve.

Les nouvelles installations sont caractérisées par les points suivants : l'énergie électrique est produite à l'usine de Niagara de la Ontario Power C° sous forme de courants triphasés à 60000 volts et 25 périodes. Ces courants sont amenés à Syracuse par une ligne de la « Niagara Falls, Lockport and Ontario Power C° » et sont livrés, sous une tension de 55000 volts environ, à la Syracuse Rapid Transit C°. A partir des limites de la ville de Syracuse, la ligne à haute tension appartient à cette dernière compagnie : elle aboutit à une sous-station où la tension est abaissée de 55000 volts à 430 volts pour l'alimentation des commutatrices qui produisent du courant continu à 600 volts.

L'entrée de conducteurs à haute tension dans la sous-station est faite dans des tuyaux vitrifiés de 90 centimètres, munis chacun d'un disque de verre de $1^{cm},25$ d'épaisseur à travers lequel un trou donne passage au câble.

Les interrupteurs à huile ont été dimensionnés d'une façon particulière à cause de la haute tension employée. Les transformateurs à huile sont refroidis par un système de circulation d'eau. Les enroulements à haute tension sont groupés en triangle et les enroulements à basse tension forment un groupement hexaphasé pour l'alimentation des commutatrices. Chaque transformateur contient un thermomètre avertisseur qui provoque le fonctionnement d'un signal d'alarme quand la température dépasse une limite déterminée : l'échauffement ne doit pas dépasser 40 degrés au-dessus de la température de l'eau de circulation à son entrée dans les appareils. Tous les isolements ont été essayés à 120000 volts du côté secondaire et 10000 volts du côté primaire. Les commutatrices sont des machines à huit pôles de 1000 kilowatts, 25 périodes, 600 volts : ces machines sont compound. Chacune d'elles est munie d'un petit moteur asynchrone pour le démarrage.

La ligne de transmission à 60000 volts est établie entièrement sur des pylônes en acier d'environ 13 à 18 mètres de hauteur au-dessus du sol. Les conducteurs de la ligne de transmission sont des *câbles en acier* : c'est le premier exemple que l'on rencontre d'une semblable application. Chaque câble est à 7 brins : les portées ont 75 mètres environ ; la plus longue portée est de 125 mètres. Les isolateurs à triple cloche sont placés aux sommets d'un triangle équilatéral ayant $2^{m},10$ de côté et sont supportés par des bras en acier rivés sur les pylônes quadrangulaires.

R. R.

***Ligne de transmission expérimentale à 100000 volts.* — K. Wernicke.** — *Electrical World*, 14 juillet 1906.

Dans les essais d'isolateurs à haute tension, on reproduit artificiellement, au moyen de vapeur d'eau, les conditions désavantageuses dans lesquelles les appareils se trouvent dans la pratique en service courant. Il est beaucoup meilleur et plus sûr d'essayer les isolateurs dans leurs conditions réelles de fonctionnement, c'est-à-dire sur une ligne expérimentale, et en mesurant les différentes tensions qu'ils peuvent supporter sans céder pour différentes conditions extérieures de pluie, vent ou neige.

D'après R. Frieze, les phénomènes que manifestent les isolateurs en présence de la pluie ou de l'humidité sont les suivants : la surface supérieure de la cloche de l'isolateur est rendue conductrice par la pellicule d'eau qui s'y trouve ; le petit courant d'eau qui tombe du bord de la cloche supérieure est au même potentiel que la ligne ; mais les gouttes d'eau ne suivent pas les lois de la gravitation, car elles sont attirées par le support de l'isolateur qui est au potentiel opposé : de cette façon l'eau forme un circuit conducteur entre le conducteur de ligne et la tige qui supporte l'isolateur. Un vent horizontal assez fort vient évidemment en aide à la formation de ce circuit liquide et abaisse ainsi le potentiel pour lequel se produit la décharge.

Evidemment, il est impossible, sur une ligne expérimentale, d'essayer tous les isolateurs fabriqués, mais on peut essayer quelques échantillons de chaque type et les étudier aussi complètement que possible.

La société Isolatorwerke, de Pankow, près de Berlin, a établi une ligne expérimentale munie d'isolateurs de l'Ambroïn Werke (brevets

Kleinsteuber). La description de cette ligne offre quelque intérêt, puisque la tension employée est de 100 000 volts.

La ligne part d'un transformateur de 20 kilowatts établi par la Cie Westinghouse et présentant comme rapport de transformation 2/1000. Le circuit primaire contient un interrupteur bipolaire, un disjoncteur à maxima, un voltmètre thermique et un ampèremètre thermique. Le voltmètre est gradué de façon à indiquer directement la tension secondaire, bien qu'il soit placé dans le circuit primaire. Le courant primaire est de 18 ampères avec le secondaire sur circuit ouvert à 100 000 volts.

Un régulateur, semblable à un controller de traction, permet de modifier la tension par échelons de 10 000 volts : ce régulateur peut être remplacé par un régulateur d'induction qui permet de modifier graduellement la tension.

Les conducteurs de ligne sont en cuivre galvanisé et ont $1^{mm},5$ de diamètre. Ils traversent le mur à travers une plaque d'ambroïne, de $1\,000 \times 1\,000 \times 25$ millimètres dans laquelle sont placés deux tubes d'ambroïne de 60 millimètres de diamètre extérieur, 26 millimètres de diamètre intérieur et 60 millimètres de longueur : Les deux tubes sont placés à une distance de 500 millimètres d'axe en axe. La ligne est supportée ensuite par des poteaux en bois de 5 mètres de hauteur, portant les isolateurs des différents modèles. Pour l'essai des isolateurs, on relie à l'un des conducteurs la tige de l'isolateur, elle-même supportée sur une traverse isolée, et on relie l'isolateur à l'autre conducteur.

Les premières expériences ont consisté seulement à essayer l'installation en soumettant la ligne à la tension de 100 000 volts pendant une heure par jour durant plusieurs jours. Le seul trouble constaté a été produit par l'ouverture du disjoncteur, quand la tension augmentait trop rapidement. Les variations de tension se faisant par échelon de 10 000 volts, chaque augmentation de voltage était accompagnée d'une élévation de courant. Quand l'opérateur n'attendait pas au moins 15 secondes après chaque échelon de réglage, l'augmentation de courant déterminait le fonctionnement du disjoncteur automatique. Avec le régulateur d'induction, aucun trouble n'a été constaté. L'élévation de tension peut être entendue le long de la ligne par le son produit. A partir de 40 000 volts, il y a une auréole perceptible autour des fils, et le bourdonnement produit décèle le passage d'électricité dans l'atmosphère. A 100 000 volts, il se produit une auréole aux points où les conducteurs traversent les tubes dans les plaques d'entrée. Les bornes des transformateurs et les connexions sont entourées d'une gaine lumineuse.

Après les essais préliminaires, on a procédé aux essais d'isolateurs qui se poursuivent depuis six mois dans d'excellentes conditions.

R. R.

Câble à 100000 volts.

Un câble Pirelli, établi pour 100 000 volts en service normal, est exposé à Milan. Un tronçon de ce câble, établi d'après le système des couches concentriques de capacités inductives spécifiques différentes, a été essayé à 300 000 volts : le câble lui-même a été essayé à 150 000 volts sans qu'il ne soit résulté aucune détérioration. La fabrication de ce câble est la suivante :

Le conducteur torsadé est recouvert d'une couche de plomb de façon que la surface soit lisse et présente un plus grand rayon. L'isolant est disposé en couches dont la capacité inductive spécifique va en décroissant du centre à la périphérie, de façon à obtenir un gradient de potentiel uniforme.

Le conducteur comprend 19 fils de $3^{mm},3$ de diamètre : la section totale est de 162 millimètres carrés. Le tube de plomb qui recouvre ce conducteur a 18 millimètres de diamètre extérieur. La première couche d'isolant est constituée par $2^{mm},5$ de caoutchouc de capacité inductive spécifique égale à 6,1 : la seconde et troisième couches sont en caoutchouc et ont $2^{mm},3$ et $4^{mm},5$ d'épaisseur : leurs capacités inductives spécifiques sont de 4,7 et 4,2 respectivement. Ensuite vient une couche de papier imprégné de $5^{mm},2$ d'épaisseur de capacité inductive spécifique égale à 4. Le câble est ensuite revêtu et recouvert d'une enveloppe de plomb : l'épaisseur totale de l'isolant est de $14^{mm},5$.

R. R

ÉCLAIRAGE

***Expériences faites avec des appareils permettant de déterminer l'intensité sphérique moyenne et l'intensité hémisphérique moyenne.* — B. Monasch.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 19 et 26 juillet 1906.

Les appareils permettant de déterminer l'in-

tensité moyenne dans l'espace par une seule mesure photométrique ont été décrits pour la première fois par M. Blondel, qui désignait ces appareils sous le nom de lumenmètres (1895). Dans les trois sortes de lumenmètres proposés, la source lumineuse était placée au centre d'une sphère opaque d'où la lumière pouvait sortir par une ou plusieurs ouvertures : la lumière était projetée, après une ou plusieurs réflexions, sur un écran qui était photométré comme source lumineuse propre. L'inconvénient de cet appareil est son prix élevé et ses limites d'emploi peu étendues : il ne peut être employé que pour des sources lumineuses symétriques par rapport à l'axe, quand on peut déterminer l'intensité lumineuse par une seule mesure photométrique.

Le photomètre intégrateur de Matthews ne peut être employé aussi que pour des sources lumineuses symétriques, ou pour des sources lumineuses asymétriques que l'on peut faire tourner rapidement sur elles-mêmes, comme, par exemple, les lampes à incandescence.

En 1900, Ulbricht a décrit un appareil composé d'une sphère à réflexion diffuse dans son intérieur, portant une petite ouverture munie d'une fenêtre opale. Ce photomètre sphérique coûte environ le quart d'un lumenmètre Blondel de même diamètre et est d'un emploi commode. La théorie de cet appareil a été donnée récemment [1] ; c'est un photomètre intégrateur.

La mesure de l'intensité lumineuse hémisphérique présente de l'importance dans un grand nombre de cas : c'est en effet, par exemple, l'intensité hémisphérique seule qui est intéressante pour l'éclairage des rues ou des espaces découverts. L'étude de Bloch [2], qui a montré l'utilisation du photomètre d'Ulbricht pour la mesure de l'intensité hémisphérique, présente donc un grand intérêt. D'après les études d'Ulbricht et de Bloch, le photomètre d'Ulbricht doit, en outre, se prêter aux mesures des sources lumineuses asymétriques.

Il y a lieu de distinguer, parmi les sources lumineuses, les sources uniformes et les sources non uniformes : ces dernières se divisent elles-mêmes en sources symétriques et sources asymétriques par rapport à l'axe.

L'auteur s'est proposé d'étudier si, par suite des phénomènes de diffusion dans les sphères, une seule mesure en un point quelconque de la surface de la sphère suffit pour déterminer l'intensité moyenne sphérique ou hémisphérique de sources lumineuses fortement asymétriques par rapport à l'axe. Ulbricht a bien réalisé le cas d'une source asymétrique en masquant, par un écran, la moitié d'une lampe à incandescence ; mais ce cas ne correspond pas aux cas pratiques présentés par les lampes à arc. Il a donc paru nécessaire d'élucider ce point par des expériences détaillées.

Pour voir si l'asymétrie de sources lumineuses était compensée dans la sphère pour la fenêtre de mesure, on mesurait l'éclairement par lumière indirecte pour différents points d'un méridien de la sphère, et on tournait ensuite la source lumineuse de façon que le même méridien fût éclairé par un autre point de la source. Si l'éclairement de tous les points individuels d'un méridien par la lumière indirecte est le même pour différentes positions du méridien par rapport à la source lumineuse, on peut recommander l'emploi du photomètre sphérique pour la détermination, par une seule mesure, de l'intensité sphérique ou hémisphérique des sources lumineuses asymétriques.

La sphère employée avait un diamètre de 2 mètres et était constituée par une charpente en fer disposée suivant le méridien et recouverte de tôle. Cette sphère portait des ouvertures d'observation placées dans des plans méridiens décalés de 90° et correspondant à des angles au centre de 10 en 10 degrés. Pendant qu'on observait par une de ces ouvertures, on pouvait fermer les autres au moyen de volets. La partie supérieure de la sphère pouvait être soulevée. A la partie supérieure était enlevée une calotte de 50 centimètres de diamètre : cette ouverture pouvait être fermée par un couvercle.

L'intérieur de la sphère était badigeonné d'un mélange de sulfate de baryum et de laque, donnant une teinte blanc mat et présentant une bonne adhérence. Avant d'employer ce badigeonnage, l'auteur a fait des expériences sur différents badigeonnages en éclairant les surfaces au moyen d'un faisceau de rayons lumineux provenant d'une lampe Nernst et d'une fente étroite. Ces expériences ont montré qu'avec le revêtement indiqué la réflexion diffuse suit la loi de

(1) Voir *Eclairage Électrique*, tome XLVI, 17 mars 1906, p. 432.
(2) Voir *Éclairage Électrique*, tome XLVII, 16 juin 1906, p. 430.

Lambert avec une approximation suffisante quand le rayon incident est normal à la surface. Il faut veiller à ce que le revêtement ne présente aucun grain et soit bien homogène.

Emploi d'une demi-sphère. — L'emploi d'une sphère entière de grand diamètre étant encombrant et coûteux, l'auteur a cherché s'il ne serait pas possible de déterminer, au moyen d'une demi-sphère seulement, l'intensité lumineuse sphérique ou hémisphérique moyenne.

a) Demi-sphère ouverte. — Si l'on place le point lumineux de la source à étudier au centre du grand cercle d'une demi-sphère ouverte, dont le plan équatorial est horizontal, le flux lumineux hémisphérique inférieur de la source lumineuse atteint la demi-sphère. Chaque élément de surface revêtue d'un badigeonnage à réflexion diffuse radie de la lumière dans toutes les directions d'après la loi de Lambert. Donc, outre la lumière provenant directement de la source lumineuse, chaque point de la surface de la demi-sphère reçoit de la lumière indirecte des autres points et il est facile de montrer que l'éclairement dû uniquement à de la lumière indirecte est directement proportionnelle à l'intensité hémisphérique moyenne. Cette démonstration est analogue à celle de Bloch. Mais on voit aussi qu'une partie des flux lumineux émanant des éléments superficiels vont en dehors de la demi-sphère et ne servent pas à éclairer les parois de celle-ci. La perte qui en résulte pour l'éclairement des parois de la demi-sphère se traduit par une modification de la constante de la demi-sphère par rapport à la constante de la sphère entière revêtue du même badigeonnage. Si l'on entend par constante de l'appareil la valeur par laquelle il faut multiplier l'éclairement de la fenêtre ou son éclat superficiel pour obtenir l'intensité lumineuse hémisphérique moyenne, la demi-sphère ouverte possède une constante de valeur plus élevée que la sphère entière.

Pour un emploi pratique, la demi-sphère ouverte n'est pas à recommander, car il peut se produire, sur les parois, murs ou objets situés à l'extérieur de la sphère, des réflexions qui faussent les résultats de mesure.

b) Demi-sphère fermée. — Pour éviter les influences perturbatrices de l'extérieur, on peut fermer la demi-sphère par un couvercle plan. On peut badigeonner l'intérieur de ce couvercle ou bien avec un revêtement noir mat, ce qui correspond au cas de la demi-sphère ouverte, ou bien avec le même revêtement blanc que les autres parois : la surface intérieure du couvercle prend alors part à la réflexion diffuse. Si l'on place alors la source lumineuse en un point quelconque à l'intérieur de la demi-sphère, le couvercle reçoit de la lumière directe qu'il réfléchit ; si on place la source lumineuse au centre de la sphère de façon que le flux lumineux hémisphérique inférieur seul pénètre dans la sphère, le couvercle ne reçoit que de la lumière indirecte. L'étude analytique de la réflexion diffuse de la demi-sphère dans ce cas est très difficile, d'autant plus difficile que la loi de Lambert n'est plus applicable, puisque la lumière ne tombe pas normalement à la surface du couvercle. Il n'y a donc, dans ce cas, que l'expérience qui permette de décider si l'emploi de la demi-sphère est admissible pour les mesures de l'intensité lumineuse sphérique ou hémisphérique.

(A suivre.) E. B.

Comparaison entre les unités photométriques française, allemande et anglaise

Des expériences ont été faites récemment à l'institut physico-technique de Berlin (Reichanstalt), pour comparer les trois sources lumineuses étalons employées dans les différents pays, l'étalon anglais de 10 bougies au pentane, la carcel française, et la lampe Hefner allemande. Un certain nombre de précautions de détail, prises minutieusement, ont assuré à ces essais le maximum d'exactitude. Les résultats finaux obtenus sont les suivants :

L'étalon au pentane vaut. .	11,0 hefners
La carcel vaut.	10,8 hefners

E. B.

Sur les lampes Bastian à vapeur de mercure.

— *Electrical Review*, 13 juillet 1906.

La lampe Bastian a déjà été décrite à son origine. Depuis cette époque, un certain nombre de perfectionnements ont été réalisés, et l'emploi de ce mode d'éclairage est devenu pratique. Depuis la fin de 1904, on est parvenu à établir des lampes pouvant fonctionner seules sous une tension de 250 volts. Le tube qui constitue la lampe et les godets formant électrodes sont en verre

(1) Voir *Éclairage Électrique*, tome XL, 22 septembre 1904, p. 509.

dur d'Iéna. L'amorçage est obtenu par un mouvement de bascule, produit par l'action d'un électroaimant. Le verre dur d'Iéna ayant un coefficient de dilatation inférieur à celui du platine, on s'est heurté à des difficultés assez grandes au début pour la soudure des électrodes. Actuellement, la fabrication courante donne d'excellents résultats, puisque beaucoup de lampes ont fonctionné pendant plus de 5 000 heures et que l'une d'elles a dépassé la durée de fonctionnement de 10 600 heures. Pendant cette durée, il se produit une légère décoloration du verre, excepté sur une faible longueur d'environ 1 centimètre à proximité de la cathode. Le rendement de la lampe ne s'abaisse pas de 5 %. Plus de 3000 lampes sont actuellement en fonctionnement. Elles sont généralement employées avec des lampes à incandescence à filament de carbone; la lumière résultante est blanche et tout à fait analogue à la lumière du jour. R. R.

MESURES

***Électromètre à quadrants transportable avec enregistrement photographique.* — Elster et Geitel.** — *Physikalische Zeitschrift*, 15 juillet 1906.

Les auteurs décrivent le dispositif qu'ils ont employé pour déterminer la chute de potentiel de l'électricité atmosphérique. L'appareil de mesure était un électromètre à quadrants de Thomson de leur construction, dont les parties isolées étaient fixées sur de l'ambre. Pour la mesure de différence de potentiel de 0 à 250 volts, comme celles que l'on rencontre pour la détermination de la chute de potentiel de l'atmosphère, les auteurs employaient le montage suivant : l'aiguille de l'électromètre était relié au corps dont on voulait mesurer le potentiel, c'est-à-dire au collecteur, et les quadrants étaient reliés aux pôles d'une pile sèche ou à ceux d'une batterie de 2, 4, 6, 8, 10 ou 12 éléments secs dont le milieu était relié à la terre. La sensibilité augmente avec le nombre d'éléments employés. Tandis que, avec un seul élément, la région commode pour les mesurer était comprise entre 100 et 250 volts, la sensibilité était suffisante, avec 12 éléments, pour déterminer d'une façon assez exacte des potentiels de 0 à 50 volts. Une petite batterie sèche de 12 éléments fut donc reconnue suffisante pour obtenir tous les degrés de sensibilité nécessaires.

L'électromètre enregistreur lui-même est établi de la façon suivante : un coffret rectangulaire de 54 × 44 × 46 centimètres reposant sur des vis de réglage est divisé en trois parties par des cloisons de séparation. Dans la première partie est placé l'électromètre à quadrants et la batterie servant à charger ceux-ci. La deuxième partie contient un rouleau portant du papier photographique et faisant un tour en 24 heures sous l'action d'un mécanisme d'horlogerie. L'image d'une roue lumineuse est projetée par une loupe sur le miroir de l'électromètre et réfléchie de là, sous forme d'un point lumineux très petit, sur le papier photographique. La troisième partie contient les clés de réglage, de remontage et d'arrêt.

Une batterie auxiliaire alimente deux petites lampes à incandescence disposées en face des bords du papier photographique derrière un écran muni de deux petits trous, et s'allumant une fois par heure pendant un instant. Les points noirs ainsi produits sur le papier photographique servent de repères : on peut également tracer d'autres points de repère en fermant à la main un interrupteur qui commande ces lampes.

A la partie supérieure du premier compartiment est placé un électroscope d'Exner avec échelle à miroir, isolement à l'ambre et dessiccation au sodium, dont le support des feuilles est relié d'une façon permanente avec l'aiguille de l'électromètre. Un coup d'œil sur cet électroscope suffit pour voir si le potentiel de l'aiguille correspond à la région de sensibilité nécessaire. En outre, cet appareil de contrôle permet à chaque instant de mesurer en volts la déviation de l'aiguille de l'électromètre, en fermant, au moment où l'on lit sur l'échelle la divergence des feuilles d'aluminium, le circuit de la batterie auxiliaire et en notant le temps. La ligne de jonction des marques ainsi tracées sur le papier photographique coupe la courbe en un point dont on connaît la valeur par la lecture faite sur l'électroscope.

La position d'équilibre de l'aiguille, suspendue à une bande métallique mince, n'est pas influencée par les forces magnétiques : les variations de température et les réactions élastiques de la suspension la modifient très légèrement. Mais le contrôle de ces modifications est très facile : pour cela, on relie pendant un instant

l'aiguille à la terre et l'on regarde par un tube métallique l'image réfléchie d'une fente : quand l'aiguille est à la position convenable, cette fente apparaît au milieu du champ de vision : si ce n'est pas le cas, on tourne un peu la tête de torsion pour ramener l'aiguille à la bonne position.

Pour permettre un fonctionnement continu plus commode de l'appareil, on y a placé deux cylindres à papier photographique. Les photogrammes ont une longueur de 376 millimètres et une largeur de 145 millimètres.

E. B.

Influence de la fréquence et de la forme d'ondes sur les voltmètres électrostatiques. — **G. Benischke.** — *Physikalische Zeitschrift,* 1er août 1906.

Une étude a été publiée par Fischer sur l'influence de la fréquence sur les voltmètres électrostatiques [1]. L'auteur a montré depuis plusieurs années qu'il existait entre un voltmètre électrostatique de Thomson et un appareil semblable de l'A.E.G. des différences dépendant de la fréquence, la forme d'ondes restant la même. Les appareils à enveloppe isolante ont été abandonnés pour les mesures autres que des vérifications d'isolement.

La cause des écarts existant est due en partie, comme l'a indiqué Fischer, aux diélectriques, mais elle est due aussi à un couple provenant de la radiation d'électricité par l'aiguille mobile (action des pointes).

En ce qui concerne la cause de l'action des diélectriques, l'auteur n'admet pas l'hypothèse émise par Fischer qui l'attribue à la dispersion des lignes de force électriques. Cette dispersion existe évidemment, mais la différence entre les valeurs qu'elle présente pour une fréquence nulle (courant continu) et une fréquence de 50 périodes est si faible qu'elle ne peut occasionner les écarts constatés. La cause des écarts constatés doit plutôt être cherchée dans les charges résiduelles des diélectriques qui, comme l'on sait, dépendent de la durée de charge ou de la fréquence. Les charges résiduelles sont produites non par les lignes de dispersion électriques, mais par le passage direct de l'électricité des parties métalliques restées sous tension depuis la dernière mesure effectuée et par des actions électriques extérieures (charges atmosphériques, frottements, influence). L'effet produit dépend des conditions d'établissement de l'appareil. Un écran métallique enveloppant le plus complètement possible les portions actives assure une bonne protection, de même que l'exclusion des diélectriques, dans la mesure du possible. Même dans les appareils à bobine mobile à courant continu et dans les appareils dynamométriques, il faut employer, pour la haute tension, des écrans ainsi constitués.

La seconde cause d'écarts entre les résultats obtenus sur courant continu et sur courant alternatif, qui se manifeste seulement aux hautes tensions, est le couple produit sur le système mobile par la dispersion électrique. Pour réaliser des aiguilles légères, on emploie toujours des feuilles métalliques très minces, dont le bord est très aigu, et il se produit un effet analogue à l'expérience classique de la décharge d'une pointe qui fait tourner un moulinet. L'effet dépend de la valeur maxima de la tension et non de la valeur efficace. Pour une même tension, la valeur maxima est $\sqrt{2}$ fois plus grande sur courant alternatif que sur courant continu (en supposant une forme sinusoïdale de la courbe dans le premier cas). Il existe donc là un effet de la forme d'ondes, dépendant du facteur de forme, et qui s'ajoute à l'effet de la fréquence : cet effet de la forme d'ondes dépend aussi des conditions d'établissement de l'appareil ; il peut être additif ou soustractif suivant la constitution de l'appareil. Cet effet étant sensible seulement aux tensions élevées, il peut arriver que, dans la partie inférieure de l'échelle, l'effet de la fréquence soit prépondérant, et que, dans la partie supérieure, l'effet de la forme d'ondes prenne le dessus : les courbes d'étalonnage obtenues sur courant continu et sur courant alternatif se coupent alors en un point : c'est ce qui a lieu pour les appareils de l'A. E. G. où la courbe relative au courant alternatif est située au-dessous de celle relative au courant continu jusqu'à 4000 volts, et au-dessus d'elle au delà de ce chiffre.

E. B.

[1] Voir *Éclairage Électrique*, tome XLVIII, 7 juillet 1906, page 39.

CHARTRES — IMPRIMERIE DURAND, RUE FULBERT.

Le Gérant : J.-B. Noury.

Tome XLVIII. Samedi 1er Septembre 1906. 13e Année. — N° 35.

L'Éclairage Électrique

REVUE HEBDOMADAIRE DES TRANSFORMATIONS

Electriques — Mécaniques — Thermiques

DE

L'ÉNERGIE

EXPÉRIENCES FAITES SUR UNE LAMPE A VAPEUR DE MERCURE DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE (1)

Nous avons été conduit à étudier certains phénomènes produits dans la lampe à vapeur de mercure par un champ magnétique. Les résultats obtenus nous ont paru présenter de l'intérêt tant par eux-mêmes que par les indications qu'ils donnent sur le fonctionnement des tubes à vapeur de mercure.

I. *Phénomène de Hall dans une lampe à vapeur de mercure.*

L'existence du phénomène de Hall, découvert par ce physicien en 1881 dans les conducteurs métalliques, a été constatée par Boltzmann dans des tubes de Geissler. Comme l'on sait, le phénomène de Hall dans des conducteurs métalliques se manifeste de la façon suivante : si l'on fait passer dans une plaque métallique mince de forme rectangulaire un courant circulant dans le sens longitudinal et uniformément réparti sur toute la largeur, et si l'on fait agir perpendiculairement au plan de la plaque un champ magnétique, on observe l'existence d'une force électromotrice dont la direction est perpendiculaire à la direction primitive du courant. La ligne de jonction de deux points équipotentiels qui, avant l'action du champ magnétique, était perpendiculaire à la direction du courant, tourne donc sous l'influence de ce champ.

Pour les essais dans les gaz conducteurs, Boltzmann a employé un tube de Geissler aplati quadrangulaire. Aux angles étaient soudés des fils de platine dont deux, placés suivant

(1) Communication faite à la Société de Physique de Zürich.

une diagonale, servaient à l'amenée du courant et les deux autres servaient à recueillir le courant secondaire engendré par l'action d'un champ magnétique perpendiculaire au plan des quatre électrodes.

H.-A. Wilson a étudié, pour différents gaz, l'effet de Hall, et a pu calculer, au moyen des résultats obtenus, la différence des vitesses des ions positifs et négatifs, sous l'influence d'un champ électrique, dans un gaz fortement raréfié. Il employait un tube de Geissler dont le courant primaire était fourni par une batterie d'accumulateurs à haute tension. Les électrodes secondaires, convenablement mastiquées dans le verre, pouvaient être toujours tournées de telle façon que la différence de potentiel entre elles fût nulle lorsque le champ magnétique n'agissait pas. Les résultats obtenus par ce physicien, en ce qui concerne les différences de mobilité entre les ions négatifs et les ions positifs, ont été les suivants :

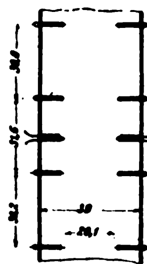
pour l'hydrogène $k_2 - k_1 = 1{,}47 \times 10^5 \times p^{-1,5}$ cm./sec.
— air $k_2 - k_1 = 1{,}42 \times 10^3 \times p^{-1,5}$ cm./sec.
— oxygène $k_2 - k_1 = 2{,}82 \times 10^4 \times p^{-1,5}$ cm./sec.

Ces valeurs concordent comme ordre de grandeur, et l'on était porté à admettre cette différence comme constante pour tous les gaz et toutes les vapeurs. E. Marx avait trouvé que, pour du KCl pulvérisé, cette différence est égale à 750 cm./sec. Cette valeur n'est pas directement comparable avec celle trouvée par Wilson, car la vitesse des ions dans les flammes dépend de la pression de l'air environnant la flamme et de la concentration de KCl.

Nous avons constaté que, dans une lampe à vapeur de mercure, l'effet de Hall est très important en comparaison de tous les résultats obtenus jusqu'alors, à tel point qu'un champ magnétique de quelques gauss suffit pour produire une chute de tension transversale de même grandeur que la différence de potentiel primaire. Nous avons donc jugé utile d'entreprendre des expériences exactes, d'autant plus que les résultats ne sont pas intéressants seulement au point de vue de la théorie des ions, mais aussi pour l'explication des phénomènes physiques qui se produisent dans une lampe à vapeur de mercure.

Pour la détermination correcte de toutes les grandeurs importantes pour l'effet de Hall, nous avons eu recours au dispositif expérimental suivant :

A égale distance des deux électrodes primaires qui étaient à 35 centimètres l'une de l'autre, on souda huit électrodes en platine et deux thermo-éléments, comme le montre la figure 1. Les électrodes, dont le diamètre était $0^{mm},3$, étaient entourées d'un tube de verre mince jusqu'à un millimètre de leur extrémité. L'extrémité découverte des électrodes était à un centimètre de distance environ de la paroi de verre, afin d'éviter les perturbations dues au voisinage de cette paroi. Les distances exactes des électrodes dans le sens longitudinal et dans le sens transversal du tube furent mesurées au moyen d'un cathétomètre : elles sont indiquées dans les tableaux qui suivent. La mesure de la température était faite au moyen de thermo-éléments en platine et platine rhodié de $0^{mm},3$ de diamètre.


Fig. 1.

L'un des fils de chaque élément était isolé par du verre jusqu'au point de soudure. Les points de soudure étaient placés à la même distance des parois en verre que les extrémités des électrodes. La courbe d'étalonnage de chaque thermo-élément était connue. Le champ magnétique agissant sur le tube était produit par une bobine formée d'une couche de tours de fils. Le diamètre de la bobine était de $44^{cm},4$; la longueur était de 22 centimètres : il y avait 5,25 tours par centimètre de longueur. Une telle bobine ne produit évidemment pas

un champ longitudinal homogène ; cependant, quand on dispose la lampe de telle façon que l'axe du tube soit exactement dans le plan médian de la bobine, la direction du champ magnétique est perpendiculaire à l'axe du tube et la force est donnée, pour le milieu de la bobine, par la formule

$$k = 2\pi ni = \frac{2l}{\sqrt{R^2 + (2l)^2}}.$$

La valeur de k était de 2,98 gauss pour une intensité de courant de un ampère. l, R et n désignent la longueur, le rayon et le nombre de tours d'enroulement par centimètre de longueur de la bobine. Une expérience directe, dans laquelle le champ fut déterminé au moyen d'un galvanomètre et d'une bobine d'induction, montra que la valeur trouvée pour l'unité d'intensité de courant était égale à la valeur théorique. La mesure de l'intensité de courant dans la bobine et dans la lampe était effectuée au moyen d'appareils de précision Siemens. Pour la mesure de la différence de potentiel aux électrodes secondaires, on employait un électromètre à quadrants de Curie. Les deux quadrants de cet appareil étaient reliés aux extrémités d'une batterie de huit accumulateurs, et l'aiguille était connectée à l'une des électrodes transversales, la seconde électrode transversale correspondante étant reliée au milieu de la batterie.

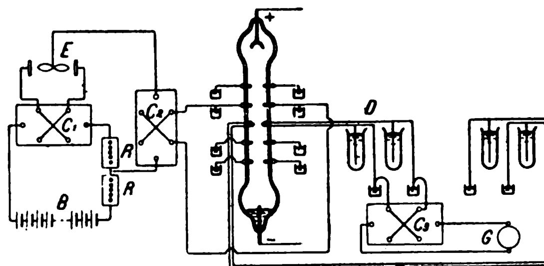


Fig. 2. — Schéma du dispositif expérimental.

Le dispositif expérimental est représenté par la figure 2. Les récipients D servent à refroidir les points de soudure des thermo-éléments. La carcasse de l'électromètre était reliée à la terre. Si l'on désigne par P_1 et P_2 les potentiels des quadrants et par Q celui de l'aiguille, on a pour la déviation l'expression :

$$\alpha = C\,[(P_1 - P_2)\,Q - {}^1/_2\,(P_1 + P_2)].$$

Pour $P_1 - P_2 =$ constante, on a l'expression suivante :

$$\alpha_1 = C_1\,[Q - {}^1/_2\,(P_1 + P_2)].$$

Si l'on inverse, on obtient une déviation α_2 donnée par la formule :

$$\alpha_2 = C^2\,[Q + {}^1/_2\,(P_1 + P_2)].$$

La déviation moyenne résultant des deux précédentes est :

$$\alpha_m = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} = C_3 Q.$$

Les déviations sont donc proportionnelles au potentiel de l'aiguille : on peut donc, après étalonnage de l'électromètre au moyen d'un élément étalon, déduire directement, des déviations lues sur l'échelle, la différence de potentiel existant entre les électrodes transversales. L'aiguille de l'électromètre était disposée de façon à être symétrique par rapport aux deux quadrants, c'est-à-dire que les déviations lors de la commutation en C_2 (fig. 2) étaient égales entre elles sous l'action d'un élément étalon remplaçant la différence de potentiel des électrodes transversales. La charge prise par l'aiguille pour les potentiels employés est extrêmement faible, la capacité ayant pour valeur quelques centimètres seulement. En outre, on veillait au maintien d'un isolement très soigneux, pour que la charge de l'aiguille se maintînt pendant quelques minutes.

L'emploi d'une lampe à vapeur de mercure pour l'étude de l'effet de Hall présente sur

le dispositif de Wilson un grand avantage, car la densité de courant dans la lampe est environ 1000 fois plus considérable que dans le tube de Geissler employé par cet expérimentateur : les erreurs pouvant provenir d'un défaut d'isolement sont donc beaucoup plus réduites. D'autre part, la faible chute de potentiel du courant primaire permet une mesure commode avec le même électromètre et avec la même sensibilité d'appareil que pour la mesure de la différence de potentiel transversale. Par contre, il y a, dans ce dispositif, des influences de température dont il faut tenir compte, ce qui complique un peu.

Au point de vue des causes de l'effet de Hall, Wilson a montré que la théorie donnée par Donnan pour ce phénomène dans les solutions de sels est aussi applicable dans les gaz. La grandeur d'un champ électrique transversal Z est donnée par la relation

$$Z = {}^1/_2 (k_2 - k_1) X . H,$$

en désignant par k_1 et k_2 les mobilités des ions positifs et négatifs, par H l'intensité de champ, et par X la chute de tension longitudinale.

On suppose que le courant primaire dans la lampe ait la direction de l'axe positif de x et que le champ magnétique qui agit sur lui ait la direction de l'axe positif de y. L'action du champ magnétique H sur un ion de charge électrique e et de vitesse k par unité de force produit une déviation dans la direction de l'axe négatif z avec la force.

$$F = -ek (dV/dx) H .$$

Les vitesses des ions positifs et négatifs étant inégales dans la lampe à mercure, comme dans le tube de Geissler, les ions négatifs sont plus fortement déviés que les ions positifs. Le sens de la déviation est le même, car les directions de mouvement et les charges des deux sortes d'ions ont des signes opposés. Par suite de la différence de déviation des ions positifs et des ions négatifs, il se produit une séparation des charges, qui, à son tour, détermine une chute de potentiel dans la direction de l'axe négatif z. La force agissant sur un ion dans la direction de l'axe négatif z est

$$F = -e (dV/dz).$$

Cette force produit un afflux des ions dans la direction de l'axe négatif z, qui, à son tour, est la cause d'une diminution de concentration dans la direction de l'axe des z.

Quand l'état stationnaire existe dans la lampe, ce qui était le cas dans les mesures dont il s'agit, l'action des forces agissantes produit une force électromotrice transversale Z de la grandeur indiquée. La valeur de Z donnée plus haut n'est d'ailleurs valable que lorsqu'on a affaire à une solution saline complètement dissociée avec des molécules d'eau, ou avec une vapeur très peu dissociée, dans laquelle les molécules neutres jouent le même rôle que l'eau, de sorte que l'on n'ait pas à tenir compte d'un courant de molécules de vapeur non dissociées.

La mesure de l'effet de Hall fut faite de façon à éliminer, par une commutation du champ magnétique, les petites différences de potentiel existant entre les électrodes transversales avant l'action du champ magnétique. La moyenne des deux déviations que l'on obtenait pour les deux directions de champ différentes correspond évidemment à la valeur de la force électromotrice produite seulement par l'action du champ magnétique. Comme les quatre électrodes transversales servant à la détermination de la f. é. m. transversale étaient placées en différents points de la colonne positive et que la chute de potentiel varie un peu le long de celle-ci, les valeurs de la chute de potentiel dans la direction transversale sont aussi un peu différentes les unes des autres. Les différences sont, toutefois, peu importantes, et l'on en tient compte en mesurant la chute de tension du courant primaire en trois ou six endroits différents. On obtient ainsi une valeur moyenne pour la f. é. m. transversale

au moyen de seize lectures, et une valeur moyenne pour la chute de tension longitudinale au moyen de vingt-quatre lectures pour une valeur donnée de l'intensité de champ. La chute de tension longitudinale était mesurée des deux côtés du tube. Avec cette mesure, on peut suivre la variation de la chute de potentiel du courant primaire le long de la colonne lumineuse positive, et, en outre, on peut observer l'accroissement de la chute de potentiel quand le champ magnétique agit sur la lampe. Pour la grandeur des intensités de champ maxima employées dans les mesures (18 gauss), on ne peut pas déceler un accroissement de la chute de tension du courant primaire. On ne remarque pas non plus de différence de la chute de potentiel sur l'un ou l'autre côté du tube d'après la déviation de la colonne lumineuse.

Pour les faibles intensités de champ, on observe une allure linéaire de la valeur de la force électromotrice transversale Z en fonction de H. La faible différence existant dans la proportionnalité de Z et H provient de l'accroissement de pression intérieure de la lampe. La détermination de la pression d'après les températures ne peut être effectuée que si l'on suppose la vapeur saturée. Mais la vapeur ne peut être saturée qu'aux parties froides du tube, car, si elle était saturée aux parties chaudes, elle serait sursaturée aux parties froides, la pression étant à peu près la même en tous les points.

On observe dans la lampe elle-même, peu après une déviation de la colonne lumineuse, qu'il se rassemble sur les parois les plus froides du tube un dépôt de mercure condensé tandis que les parties chaudes ne reçoivent pas de mercure : la pression doit donc être calculée d'après la plus basse des températures, mais les résultats ne sont applicables à la détermination des différences de mobilité que dans les expériences pour lesquelles les deux températures extrêmes sont peu différentes, c'est-à-dire pour les essais dont les résultats sont indiqués sur le tableau I.

TABLEAU I

Effet de Hall en fonction de l'intensité du champ.

$a =$ →	cm. 2,19	cm. 2,21	cm. 1,96	cm. 2,01	cm. 2,09	cm. 3,00	cm. 3,16	cm. 3,02	cm. 3,06	cm. 3,11	cm. 2,84	cm. 3,02	cm. 2,99	cm. 3,02						
	Différence de potentiel transversale.					Différence de potentiel longitudinale à gauche.				Différence de potentiel longitudinale à droite.					Température.		Pression.		Mobilités.	
H	$S_{1\,m}$	$S_{2\,m}$	$S_{3\,m}$	$S_{4\,m}$	S_m total	S_{1-2}	S_{2-3}	S_{3-4}	$S_{m\,1}$	S_{1-2}	S_{2-3}	S_{3-4}	$S_{m\,r}$	S_m total	T basse	T haute	P min.	P max.	(k_2-k_1) (P min.)	(k_2-k_1) (P max.)
Gauss	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt			mm.	mm.	$\times 10^7$	$\times 10^7$
»	0,145	0,372	0,457	0,038	»	1,64	1,58	2,35	1,86	1,40	1,52	2,92	1,95	1,90	»	»	»	»	»	»
0,60	0,265	0,198	0,237	0,299	0,251	1,71	1,55	2,39	1,89	1,45	1,51	2,90	1,95	1,92	76,5°	77,5°	0,31	0,32	1,96	2,02
1,20	0,572	0,595	0,600	0,462	0,558	1,64	1,49	2,02	1,73	1,33	1,43	2,63	1,82	1,77	67,5°	76,5°	0,21	0,31	1,60	2,35
1,80	0,781	0,775	0,722	0,700	0,745	1,55	1,42	1,69	1,53	1,29	1,42	2,42	1,71	1,56	63,5°	73,0°	0,18	0,26	1,38	2,0
2,40	0,910	0,907	0,840	1,021	0,910	1,69	1,52	2,17	1,77	1,45	1,50	2,67	1,87	1,80	70,0°	77,5°	0,24	0,32	1,46	1,84
3,00	1,00	1,195	0,926	1,285	1,09	1,69	1,63	2,42	1,91	1,58	1,57	2,89	1,98	1,96	69,0°	78,0°	0,23	0,32	1,15	1,58

a = distance des électrodes. L'intensité du courant dans la lampe avait une valeur constante de 1 ampère.

Comme moyenne pour $(k_2 - k_1)\, p^{\text{mm}}_{\text{min.}}$, on trouve $1,51 \times 10^7$ cm./sec. par volt.

On voit que la différence des mobilités $k_1 - k_2$ reste constante, comme le faisait prévoir la formule théorique :

$$k = \lambda e/mv \qquad \text{et} \qquad \lambda = \text{constante/densité},$$

en désignant par λ la longueur moyenne de libre parcours, par e la charge d'un ion, par m

la masse et par v la vitesse d'un ion par suite de l'agitation thermique. La densité n'étant pas restée absolument constante dans les expériences auxquelles se rapporte le tableau I, $k_2 - k_1$, varie aussi un peu.

Des expériences ont été faites ensuite pour la détermination de l'effet de Hall avec de fortes intensités de champ. Malheureusement on ne pouvait aller au delà de 15 gauss à cause de l'échauffement qui se produisait sur un des côtés de la lampe. Les résultats sont résumés par le tableau II.

TABLEAU II

Effet de Hall en fonction de l'intensité du champ.

$a =$ →	cm. 2,19	cm. 2,21	cm. 1,96	cm. 2,01	cm. 2,09	cm. 3,00	cm. 3,16	cm. 3,02	cm. 3,06	cm. 3,11	cm. 2,84	cm. 3,02	cm. 2,99	cm. 3,02						
Différence de potentiel transversale.						Différence de potentiel longitudinale									Température.		Pression.		Mobilités.	
						à gauche.				à droite.										
H	S_1 m	S_2 m	S_3 m	S_4 m	S_m total	$S_1 - 2$	$S_2 - 3$	$S_3 - 4$	S_m 1	$S_1 - 2$	$S_2 - 3$	$S_3 - 4$	S_m r	S_m total	T basse	T haute	P min.	P max.	$(k_2 - k_1)$ (P min.)	$(k_2 - k_1)$ (P max.)
Gauss	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt			mm.	mm.	$\times 10^7$	$\times 10^7$
3,00	0,82	0,79	0,67	0,92	0,81	2,13	1,89	2,00	2,16	2,09	1,85	2,70	2,21	2,19	80,0°	97,0°	0,35	0,67	1,24	2,38
6,00	1,56	1,45	1,34	1,82	1,52	2,13	1,90	2,37	2,11	2,07	1,72	2,54	2,11	2,11	71,5°	98,0°	0,25	0,69	0,87	2,38
9,00	1,97	1,93	1,64	1,89	1,87	1,97	1,90	2,15	2,00	1,90	1,69	2,46	2,02	2,01	70,0°	103,5°	0,24	0,84	0,72	2,50
12,0	2,08	2,17	1,84	2,06	2,04	2,06	1,92	2,17	2,05	2,10	1,81	2,52	2,10	2,07	72,0°	112,0°	0,25	1,17	0,59	2,78
14,7	2,42	2,52	2,12	2,33	2,35	2,34	1,90	2,14	2,10	2,05	1,81	2,46	2,08	2,10	67,0°	113,0°	0,21	1,18	0,47	1,64

L'intensité de courant dans la lampe était maintenue constante à la valeur de 1 ampère.

Tandis que, pour les faibles intensités de champ (tableau I) on observe une variation à peu près linéaire avec H, on voit, d'après le tableau II, que, à partir de H = 5 gauss, la valeur de Z croît de plus en plus lentement avec H : pour H = 14 gauss, la force électromotrice de Hall croît à peine avec l'intensité de champ, car l'échauffement d'un côté produit une si forte variation de la densité de vapeur d'un point du tube à l'autre, que son action est comparable à celle du champ.

La relation entre l'effet de Hall et l'intensité du courant dans la lampe fut déterminée dans une troisième série d'expériences. Les résultats obtenus sont indiqués sur le tableau III. A première vue, le rapide accroissement de la force électromotrice transversale avec l'augmentation de l'intensité de courant semble surprenante, mais elle s'explique par l'augmentation de densité produite par l'accroissement de pression. Cet accroissement de pression atteignait son maximum pour 1,4 ampères.

Alors que la valeur de $(k_2 - k_1)p$ était à peu près constante jusqu'en ce point et était à peu près la même, en moyenne, que dans la série d'expériences I, elle diminue rapidement à partir de 1,4 ampères. La cause de cette diminution semble devoir être cherchée dans la variation du degré de dissociation de la vapeur traversée par le courant. L'influence du degré de dissociation sur l'effet de Hall a été montrée par Thonnan pour les solutions salines.

On ne peut pas s'attendre à une concordance exacte des valeurs trouvées pour $(k_2 - k_1 p,)$ car la loi, d'après laquelle ce produit doit avoir une valeur constante, n'est qu'approximativement rigoureuse, et la détermination de la pression d'après la température présente uelque incertitude.

TABLEAU III

Effet de Hall en fonction de l'intensité de courant dans la lampe.

a = →	cm. 2,19	cm. 2,21	cm 1,96	cm. 2,01	cm. 2,09	cm. 3,00	cm. 3,16	cm. 3,02	cm. 3,06	cm. 3,11	cm. 2,84	cm. 3,02	cm. 2,99	cm. 3,02						
Différence de potentiel transversale.						Différence de potentiel longitudinale									Température.		Pression.		Mobilités.	
						à gauche.				à droite.										
I Lampe	S_1 m	S_2 m	S_3 m	S_4 m	S_m total	S_1-2	S_2-3	S_3-4	S_m 1	S_1-2	S_2-3	S_3-4	S_m r	S_m total	T basse	T haute	P min.	P max.	$(k_2-k_1)(p_{min.})$	$(k_2-k_1)(p_{max.})$
Gauss	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt	Volt			mm.	mm.	$\times 10^7$	$\times 10^7$
0,80	1,86	1,78	1,42	1,08	1,47	1,54	1,23	1,51	1,43	1,26	1,26	1,79	1,43	1,43	54,0°	63,0°	0,12	0,18	1,19	1,79
1,10	1,04	1,02	0,89	1,08	1,01	1,69	1,40	1,85	1,65	1,52	1,47	2,41	1,80	1,80	71,0°	83,0°	0,24	0,40	1,35	2,24
1,40	0,63	0,59	0,58	0,69	0,63	1,93	1,70	2,18	1,94	1,28	1,61	2,28	1,72	1,92	86,2°	101,0°	0,44	0,77	1,46	1,98
1,70	0,42	0,42	0,34	0,39	0,39	1,67	1,40	1,78	1,60	1,55	1,29	1,81	1,56	1,56	84,7°	100,7°	0,42	0,76	1,01	1,71
2,00	0,27	0,27	0,22	0,27	0,26	1,38	1,21	1,48	1,35	1,29	1,11	1,61	1,34	1,34	84,5°	95,0°	0,41	0,62	0,76	1,17

L'intensité de champ était constante pendant tout l'essai et égale à 3 gauss.

Comme moyenne pour $(k_2 - k_1)\, p^{mm}$ on trouve, d'après les trois premières valeurs, $1{,}33 \times 10^7$ cm /sec. par volt.

Le principal résultat de l'étude de l'effet de Hall est la détermination numérique de $k_2 - k_1$. Elle résulte d'une détermination faite à une valeur donnée de la pression et de la température et de la variation présentée en fonction de la pression et de la température. Si la vapeur de mercure était partout saturée, la mesure de la température suffirait pour la détermination de deux variables. Cela n'est pas le cas, comme le montre la divergence des résultats de mesure obtenus avec les thermo-éléments. On doit admettre, en outre, que le plus froid des deux thermo-éléments ne donne pas la température la plus basse dans le tube, et, par suite, ne permet vraisemblablement pas de déterminer la pression dans le tube d'après la courbe de tension de vapeur. Les expériences montrent que la différence de température entre les deux thermo-éléments augmente quand les causes qui produisent l'inégalité de température, c'est-à-dire H et I, vont en croissant. On doit admettre que, dans les cas où les deux thermo-éléments indiquent la même valeur, la pression correspond bien à celle de la courbe de tension de vapeur.

Il est donc possible de connaître exactement, pour la première série d'expériences (tableau I), la relation entre la pression et la température. Les autres expériences peuvent, d'après ce qui précède, être considérées simplement comme une vérification de la première série d'expériences et montrent comment les résultats sont modifiés peu à peu quand on s'écarte peu à peu des conditions correctes d'expérience. La relation entre la différence de mobilité et la pression ou la loi de proportionnalité de $(k_2 - k_1)$ avec $1/p$ ne peut pas être déterminée d'après les résultats du tableau III, car les différences des pressions correspondant aux différentes températures en différents points du tube sont du même ordre de grandeur que les variations de pression d'une expérience à l'autre.

On peut donc tirer les conclusions suivantes des essais effectués :

$$(k_2 - k_1)\, p^{\text{mm. mercure}} = \frac{0{,}151 + 0{,}133}{2} \times 10^8$$

$$(k_2 - k_1)\, p^{\text{mm. mercure}} = \frac{1{,}42 \times 10^7}{V} \text{cm./sec.}$$

On voit donc que la différence de mobilité des ions dans la vapeur de mercure est plus de

100 fois plus grande que celles existant dans l'air, l'oxygène et l'hydrogène, trouvées par Wilson. La lampe à vapeur de mercure présente une forte action de soupape (conductibilité unipolaire), ce qui est une conséquence de l'excédent de vitesse d'une espèce d'ions par rapport à l'autre. On est conduit à admettre, comme l'ont fait Stark, Retschinsky et Schaposchnikoff[1], que la vitesse des ions négatifs doit être un multiple de la vitesse des ions positifs. La grande conductibilité de la vapeur de mercure dans les lampes est ainsi expliquée par la mobilité des ions négatifs dans la vapeur de mercure beaucoup plus grande que dans les autres gaz.

II. *Productions de rayons cathodiques dans une lampe à vapeur de mercure.*

Pellat a attiré en 1904 l'attention sur la différence de trajectoires des ions négatifs et des ions positifs dans un tube de Geissler lorsque les ions pénètrent dans un champ magnétique homogène. Il a montré que, quand on place entre les tours d'une bobine un tube de Geissler traversé par du courant de telle façon que l'axe du tube et l'axe de la bobine soient perpendiculaires l'un à l'autre, la déviation de la colonne lumineuse présente une allure très différente en dehors du champ produit par la bobine suivant la position des électrodes. Alors que la colonne lumineuse dans le tube reste tout à fait homogène du côté de la cathode avant l'entrée dans le champ magnétique, du côté de l'anode la déviation s'étend au delà du champ magnétique telle qu'elle se produit dans ce dernier. L'explication donnée par Pellat conduit à la conclusion que la luminescence de la masse gazeuse dans un tube à air ou à gaz raréfié provient du choc des ions négatifs sur les molécules, tandis que des ions positifs n'exercent pas d'influence sur la luminescence. Par suite, la forme de la colonne lumineuse déviée par le champ magnétique donne une image de la forme de la trajectoire des ions négatifs qui, dans le cas où un champ magnétique agit sur la colonne lumineuse, diffère beaucoup de la trajectoire des ions positifs.

Si l'on suppose que l'ion mobile est soumis à une force magnétique de grandeur $e\mathrm{H}v$ et à une force électrique de grandeur $e\mathrm{X}$, on a, dans le cas où la force électrique et la force magnétique sont perpendiculaires l'une à l'autre, les équations de condition suivantes pour la trajectoire :

$$m\,(d^2x/dt^2) = e\mathrm{X} - e\mathrm{H}\,(dy/dt),$$
$$m\,(d^2y/dt^2) = e\mathrm{H}\,(dx/dt),$$

en désignant par m la masse d'un ion, par e sa charge, par H le champ magnétique, et par X le champ électrique, et en prenant comme axe des x la direction de X et comme axe des y la direction de H. L'intégration des équations précédentes conduit aux valeurs suivantes :

$$x = \mathrm{A}\,(1 - \cos\omega); \qquad y = \frac{\mathrm{X}}{a\mathrm{H}^2}\,\omega - \mathrm{A}\sin\omega,$$

si l'on désigne par ω une fonction de temps t et si l'on pose :

$$a = e/m; \qquad \mathrm{A} = \sqrt{\mathrm{X}^2 + v^2\mathrm{H}^2}/a\mathrm{H}^2.$$

La lettre v désigne la vitesse d'un ion à son entrée dans le champ.

Pellat a supposé $v^2\mathrm{H}^2$ petit vis-à-vis de X^2, et a posé

$$\mathrm{A} = m\mathrm{X}/e\mathrm{H}^2.$$

Les équations prennent alors la forme suivante :

$$x = \frac{m\mathrm{X}}{e\mathrm{H}^2}\,(1 - \cos\omega); \qquad y = \frac{m\mathrm{X}}{e\mathrm{H}^2}\,(\omega - \sin\omega).$$

---

[1] Voir *Eclairage Electrique*, tome XLV, 30 décembre 1905, page 481.

La courbe, représentée par ces deux équations, est une cycloïde avec un rayon de roulement A. L'axe sur laquelle se déplace le cercle roulant est l'axe y. Un ion décrit alors, lorsqu'il entre dans le champ magnétique, une cycloïde dont le cercle roulant se déplace sur une droite perpendiculaire au plan formé par les directions du champ magnétique et du champ électrique. Après avoir subi ce déplacement le long d'une certaine portion de trajectoire, l'ion atteint les parois et se déplace le long de celle-ci, par suite de l'action du champ magnétique, jusqu'à sa sortie de ce champ. A ce moment, il tend, par suite de son inertie, à conserver la direction de mouvement primitive. Mais en même temps, la présence des ions voisins produit une dispersion du faisceau lumineux qui longe la paroi de verre ; les ions exercent entre eux une action de répulsion et ont, par suite, tendance à occuper toute la section du tube. Le faisceau lumineux s'épanouit donc de plus en plus vers l'anode et remplit peu à peu tout le tube. On peut donc, d'après ce qui précède, déduire de la forme de la colonne lumineuse la direction de mouvement des ions qui produisent la luminescence du gaz dans les tubes.

Pellat a montré que la colonne lumineuse positive à l'extérieur du champ magnétique présente une allure homogène uniforme vers la cathode et conserve, du côte de l'anode, une portion déviée de la même façon que dans le champ magnétique.

Les masses des ions positifs et négatifs dans un gaz traversé par un courant étant très différentes, puisque les ions positifs ont une masse au moins 2000 fois plus grande que celle du support de l'électricité négative, on reconnaît, d'après l'équation donnée pour le rayon du cercle de la cycloïde, que celui-ci est 2 000 fois plus grand pour les ions positifs que pour les corpuscules. Dans un calcul numérique effectué avec les valeurs de X et de H relatives à ses expériences, Pellat a trouvé que l'amplitude maxima de la cycloïde pour un ion négatif n'est que de $0^{mm},018$. Cela signifie qu'en entrant dans le champ magnétique, l'ion décrit une série de cycloïdes différant d'une façon imperceptible d'une droite perpendiculaire au champ magnétique et à l'axe du tube. Au contraire, le rayon pour un ion positif, même dans le cas de l'ion présentant le minimum de masse, de l'atome d'hydrogène, a une valeur de quelques centimètres. Les courbes obtenues par Pellat présentent bien la forme théorique, en ce qui concerne les ions négatifs, mais, pour les ions positifs, on ne peut rien voir de leur trajectoire.

Nous nous sommes donc proposé de reprendre les expériences de Pellat avec des moyens perfectionnés, d'autant plus que nous avons trouvé que l'hypothèse faite par ce savant pour la valeur de la vitesse des ions en fonction de la pression et du champ électrique n'est pas exacte : il a admis en effet, pour le calcul du rayon du cercle de la cycloïde, que la vitesse v à des pressions supérieures à $0^{mm},1$ de mercure, est environ 10^{-5}X. Or cette vitesse est beaucoup plus grande. Quand la vitesse est très grande, le rayon du cercle de la cycloïde ne dépend plus seulement de la grandeur du champ électrique. Pour des pressions inférieures à $0^{mm},1$, les trajectoires des ions dans un champ magnétique présentent des formes qui dépendent surtout de la vitesse et non du champ électrique. On entre là dans le domaine des rayons cathodiques.

Nous avons eu recours au dispositif suivant. On employait comme tube de Crookes une lampe à vapeur de mercure analogue à la précédente. Pour obtenir une homogénéité aussi parfaite que possible et une limite nette du champ magnétique, on avait donné au tube une section aussi rectangulaire que possible. Les deux grands côtés du rectangle étaient distants de 17 millimètres seulement, de sorte que, par un choix judicieux des dimensions de la bobine magnétisante, on pouvait obtenir une limitation assez nette du champ magnétique. La bobine, au milieu de laquelle le tube avait été placé perpendiculairement à l'axe,

portait 3 couches de tours de fil de $1^{mm},7$. La section de la bobine était rectangulaire, avec une largeur de 80 millimètres et une hauteur de 70 millimètres. Les angles du rectangle étaient arrondis. La longueur totale de la bobine était de 300 millimètres; le nombre de tours par centimètre de longueur avait pour valeur 3,75. La forme de la bobine permettait une facile observation de la forme de la colonne lumineuse en dehors du champ. On fit d'abord fonctionner la lampe comme tube de Geissler au moyen d'une machine d'influence de Voss. La photographie relevée dans ces conditions montre nettement que les ions sortant du champ magnétique s'étalent peu à peu dans toute la section du tube. Au contraire, la forme de la colonne lumineuse vers la cathode en dehors du champ est tout à fait uniforme dans toute la section du tube. La différence de potentiel nécessaire pour faire passer une décharge dans le tube dans le sens fer-mercure était d'environ 2500 volts quand le champ magnétique était nul. Quand un champ magnétique de 218 gauss agissait sur la colonne lumineuse, la différence de potentiel entre électrodes s'élevait à 3100 volts. Pour la mesure de la différence de potentiel, on se servait d'un électromètre absolu de Thomson.

Pour étudier la variation de forme de la trajectoire, produite par l'accroissement de vitesse des ions, on vidait peu à peu le tube. La courbe conservait sa forme primitive jusqu'à ce que, pour une certaine pression, il se produisit brusquement une nouvelle répartition de la lumière.

La colonne lumineuse se sépare alors en deux ou plusieurs faisceaux distincts. L'un des systèmes de rayons présente une trajectoire telle qu'elle existerait pour des rayons cathodiques; l'autre faisceau se comporte à peu près comme précédemment. Ce phénomène se produit avec le maximum d'intensité quand il reste un peu d'air dans le tube. Une expérience montra que les deux faisceaux lumineux paraissent uniformément formés quand la pression partielle de l'air est à peu près égale à la tension de la vapeur de mercure. Cette tension était évaluée d'après la température du tube, qui était identique à la température ambiante quand un courant de 0,001 ampère environ traversait le tube pendant quelques secondes. La pression partielle de l'air était déterminée au moyen d'une jauge de Mac Leod. Une faible inégalité des deux pressions partielles produisait une forte prédominance de l'un des faisceaux sur l'autre : une seule course de la pompe à air à laquelle était relié le tube suffisait pour faire disparaître le faisceau caractéristique de l'air. Les deux faisceaux présentent une différence sensible de coloration. Avec une lampe alimentée par un courant intense (1 ampère environ), on trouva pour le faisceau lumineux dévié une forme intermédiaire entre les précédentes. La vapeur de mercure ayant, dans ce cas, une pression de l'ordre de grandeur de 1 millimètre de mercure, on pourrait en conclure que le phénomène de Pellat se manifeste aussi dans le mercure, mais seulement à des pressions plus élevées que dans l'air.

Dans le cas où le vide est très poussé et où, par suite, la pression partielle de l'air disparaît par rapport à celle de la vapeur de mercure, il se produit, après l'entrée des ions dans le champ magnétique, une contraction de ceux-ci en un faisceau qui, au début, se dirige sur le côté gauche de la paroi en verre puis, ensuite, est dévié suivant une trajectoire circulaire ou cycloïdale avec un rayon de courbure de plusieurs centimètres sur le côté opposé de la paroi en verre. Cette déviation définitive vers la droite est celle que l'on doit attendre d'après la loi de Biot et Savart. Le rayon de courbure, d'après la photographie obtenue, est d'environ 1 centimètre. Cette valeur du rayon de courbure et la connaissance des constantes de l'expérience permettent de déterminer les vitesses des ions. La différence de potentiel totale entre électrodes étant connue, on peut, en tenant compte de la chute de tension aux électrodes, déterminer le champ électrique dans une portion de colonne lumineuse positive,

en divisant par la distance des électrodes la différence de potentiel entre elles, déduction faite des chutes de tension. Pour la cathode, la chute de tension était d'environ 340 volts; pour l'anode elle devait être de 30 volts. La grandeur du champ électrique était donc

$$X = \frac{3\,100 - 370}{24,4} = 112 \text{ volts par cm.}$$

Si l'on fait le calcul du rayon de courbure pour cette valeur de X et pour la valeur H = 218 gauss, on trouve :

$$A = \frac{m}{e} \cdot \frac{X}{H} = 0,013 \text{ cm.},$$

en négligeant v^2H^2 vis-à-vis de X^2. Le rayon de courbure réel étant environ 80 fois plus grand que cette valeur théorique, on voit que la grandeur v^2H^2 est très importante pour la valeur de A. Si l'on calcule la vitesse v, pour le rayon mesuré A = 1 centimètre, on trouve environ 4.10^9 centimètres par seconde, c'est-à-dire la vitesse de rayons cathodiques. La formule pour le rayon de courbure du cercle de la trajectoire cycloïdade se transforme, quand on néglige X^2 vis-à-vis de v^2H^2, en la formule connue du rayon de courbure d'un rayon cathodique dévié circulairement. Comme il ne s'agit que de l'ordre de grandeur de v, l'exactitude du résultat, qui, avec cette méthode de détermination, est forcément faible, doit être suffisante.

On est conduit, d'après ce qui précède, à admettre qu'on a affaire à un faisceau de rayons cathodiques, dont la trajectoire dans un champ magnétique homogène serait circulaire si le champ électrostatique était nul. Cette hypothèse est vérifiée par l'expérience. Quoiqu'on n'ait encore jamais réussi à prouver qu'il existe des rayons cathodiques dans les tubes à électrodes de mercure, nous avons pu montrer que, dans certaines conditions, il est cependant possible d'obtenir, même dans la vapeur de mercure, des rayons cathodiques qui se distinguent de ceux produits dans les autres gaz en ce qu'ils amènent la vapeur elle-même à la luminescence. La production des rayons est due à la présence du mercure à la cathode.

Pour cela, nous avons pris le tube qui avait servi de lampe à vapeur de mercure, l'avons vidé et nettoyé chimiquement. Ensuite nous l'avons vidé et soumis à l'action d'une machine à influence. La disposition de la bobine magnétisante était la même que dans les expériences précédentes. Quoique, en apparence, aucune trace de mercure n'existât plus dans le tube, on retrouva le faisceau caractéristique du mercure : une vérification faite au spectroscope montra qu'il existait encore du mercure. La séparation de la colonne lumineuse en deux faisceux pour une pression déterminée n'était toutefois pas aussi nette que précédemment. Tandis que, dans les expériences antérieures, les rayons Hg se formaient de plus en plus à mesure que le vidage du tube augmentait, au point de subsister seuls, on trouva, dans le cas où le tube ne contenait plus de mercure, que les rayons disparaissaient de plus en plus avec l'augmentation du vidage et la durée de fonctionnement du tube jusqu'à ce que, finalement, les rayons cathodiques ne fussent plus produits que çà et là par une décharge. En même temps disparaissaient les petites étincelles à la cathode, qui présentaient un aspect absolument analogue à celui des petites étincelles à la surface du mercure dans une lampe fonctionnant avec un courant intense. Après un vidage aussi complet que possible, on remplissait à nouveau le tube d'air et l'on recommençait plusieurs fois l'expérience précédente. Au bout de plusieurs vidages, les rayons du mercure disparaissaient complètement. Quand, dans la première expérience, c'est-à-dire quand les rayons cathodiques du mercure existaient, on inversait le sens du courant de manière à employer l'électrode en fer comme cathode, les rayons disparaissaient aussitôt.

Ces observations montrent que la production des rayons est due à la présence de mercure à la cathode. En effet, quoiqu'un nettoyage chimique du tube eût été fait, ce nettoyage n'était pas suffisant pour faire disparaître l'amalgame existant sur la pointe de platine qui, lorsque le tube fonctionnait comme lampe à mercure, dépassait un peu le niveau du mercure pour fixer le point de passage du courant à la cathode.

Quand le vide est assez poussé dans le tube ne contenant plus trace de mercure, il se produit des rayons cathodiques ordinaires, qui provoquent la luminescence des parois de verre et non du gaz. La section du tube étant rectangulaire, on pouvait, en employant un champ magnétique, suivre entièrement la trajectoire décrite par les rayons cathodiques. La déviation circulaire de la trajectoire était prouvée par la luminescence de la paroi sur le côté antérieur du tube. Il existe donc, entre des rayons cathodiques et les rayons cathodiques du mercure, outre la différence que ces derniers provoquent la luminescence de la vapeur, une autre différence en ce qui concerne la forme de la trajectoire sous l'effet du champ magnétique. Au lieu de décrire un cercle vers la droite, le faisceau des rayons cathodiques du mercure subit d'abord une contraction, et le faisceau ainsi contracté est d'abord dévié du côté opposé à celui de la déviation définitive.

Après avoir établi que la présence de mercure à la cathode facilite la production de rayons, qui, au point de vue de certaines propriétés, diffèrent des rayons produits dans des conditions tout à fait indentiques, nous avons cherché à expliquer la contraction de la colonne lumineuse et la déviation initiale vers la gauche. Les équations du mouvement données plus haut tiennent compte de la force de l'accélération d'un ion, de la force du champ électrique et de la force du champ magnétique sur un ion. Outre ces forces, il existe, comme cela a été montré dans la première partie, encore une force provenant des vitesses inégales des ions positifs et négatifs — la force électromotrice de Hall — ainsi qu'une action électrostatique des parois de verre. On sait combien est importante l'influence des charges sur la paroi de verre d'un tube pour la formation d'un faisceau de rayons cathodiques : on le voit simplement en plaçant le doigt sur la surface extérieure du tube. Si l'on place sur l'extérieur de la paroi du tube une feuille d'étain de quelques centimètres carrés de surface, la paroi et l'armature agissent comme un condensateur. De l'armature extérieure, on peut prendre une charge avec un potentiel de plusieurs centaines de volts par rapport à la terre. On peut, par ce moyen, renforcer la charge à l'intérieur du tube, et il est possible de modifier fortement la forme de la trajectoire. Nous pensons que la déviation de la colonne lumineuse à l'entrée dans le champ doit être explicable par l'action simultanée des deux influences indiquées. Comme on l'a montré, la f. é. m. de Hall dans la vapeur de mercure a une valeur très importante quand on emploie un champ de 200 gauss environ : sa direction est opposée à celle de la force magnétique déviante, et on peut supposer que la force résultant des deux actions est supérieure à la force magnétique déviante. On ne peut pas analyser mathématiquement le phénomène, car l'influence des charges des parois échappe au calcul.

Au point de vue du mode de production des rayons cathodiques du mercure, on peut encore indiquer qu'ils semblent commencer quand il se produit, dans le tube à air raréfié, un espace de plusieurs centimètres entre la cathode et la colonne lumineuse positive. C'est aussi, comme l'on sait, le moment où il se produit dans les gaz des rayons cathodiques.

Pour déterminer finalement si le faisceau visible obtenu est constitué par des rayons cathodiques, nous avons cherché à donner au tube une forme telle que la détermination de e/m fût possible sans erreur. L'expérience suivante fut faite dans ce but. Le tube employé avait la forme représentée par la figure 3. L'anode A était une plaque de fer munie d'une fente de $1,5 \times 10$ millimètres : la cathode K était un godet rempli de mercure et placé à la

partie inférieure du tube : les parois elles-mêmes avaient une forme telle que le courant ne pût pas passer le long des parois en suivant les gouttelettes de mercure déposées pendant le fonctionnement du tube. En outre, l'étranglement augmentait la résistance intérieure du tube, ce qui est favorable à la production de rayons cathodiques du mercure. Nous avons reconnu, de plus, la nécessité de placer dans le tube aboutissant à la pompe à air une troisième électrode H, pour obtenir un beau faisceau de rayons cathodiques. La distance de cette électrode auxiliaire H à la sphère principale était d'environ 20 centimètres. Sur la partie extérieure du tube, on avait placé autour de l'anode et autour de la cathode des bandes de papier d'étain reliées à la terre ainsi que l'anode de l'électrode auxiliaire. On n'arrive pas toujours à obtenir nettement les rayons cathodiques : on obtient ce résultat en disposant convenablement les feuilles d'étain sur la paroi extérieure. La pression dans le tube doit correspondre à environ $0^{mm},01$ de mercure.

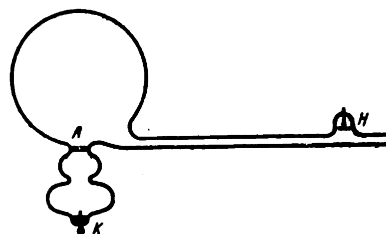


Fig. 3.

Pour montrer que le faisceau de rayons pénétrant par la fente de l'anode dans la grosse sphère est réellement constitué par des rayons cathodiques, nous avons fait agir sur lui un champ magnétique pour déterminer, d'après la valeur du rayon de courbure de la trajectoire du faisceau dévié et la valeur de la différence de potentiel librement parcourue par les électrons, le rapport de la charge à la masse des corpuscules. La bobine employée pour la production du champ magnétique possédait une couche de tours d'un diamètre de 16 centimètres et une longueur totale de 35 centimètres. L'intensité du courant produisant le champ magnétique fut maintenue constante. Les deux courbes circulaires obtenues photographiquement ont une tangente commune : le rayon de courbure est donné par la formule $R = (A^2 + B^2)/2B$, les lettres R, A et 2B correspondant à la figure 4.

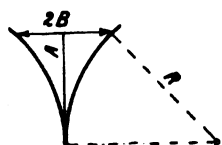


Fig. 4.

Pour les courbes obtenues photographiquement, on a $R = 12^{cm},9$. L'intensité de champ H et la différence de potentiel ΔV avaient les valeurs suivantes : $H = 13,2$ gauss ; $\Delta V = 2\,900$ volts. On peut appliquer ces chiffres aux équations connues relatives à un rayon cathodique se déplaçant dans un champ magnétique uniforme :

$$R = \frac{m}{e} \cdot \frac{v}{H}; \qquad {}^1/_2\, mv^2 = e\Delta V.$$

On trouve les résultats suivants, pour la vitesse v et pour le rapport de la charge à la masse :

$$v = 0,34 \times 10^{10} \text{ cm./sec.}$$
$$e/m = 1,95 \,.\, 10^7 \text{ unités électromagnétiques.}$$

On voit que la vitesse v correspond à celle des rayons cathodiques connus : la valeur de e/m coïncide avec celle trouvée par Simon (1,865), que l'on considère comme la plus exacte.

Quand on refroidit la partie inférieure du tube à — 35° environ au moyen d'éther et d'acide carbonique solide, les rayons cathodiques du mercure disparaissent et le tube présente une forte fluorescence verte due aux rayons cathodiques ordinaires.

Wilhelm SCHENKEL.

TRAMWAYS ÉLECTRIQUES A RÉCUPÉRATION

Dans le courant du mois de juin, des essais intéressants ont été faits, aux environs de Londres, sur des tramways électriques fonctionnant avec le système « Raworth », qui permet d'effectuer la récupération automatique du courant pendant les périodes de freinage et dans les descentes. Plusieurs ingénieurs, qui s'étaient rendus à Londres à l'occasion du Congrès des Électriciens, ont suivi ces essais et nous pensons qu'il est intéressant de donner à ce sujet quelques détails.

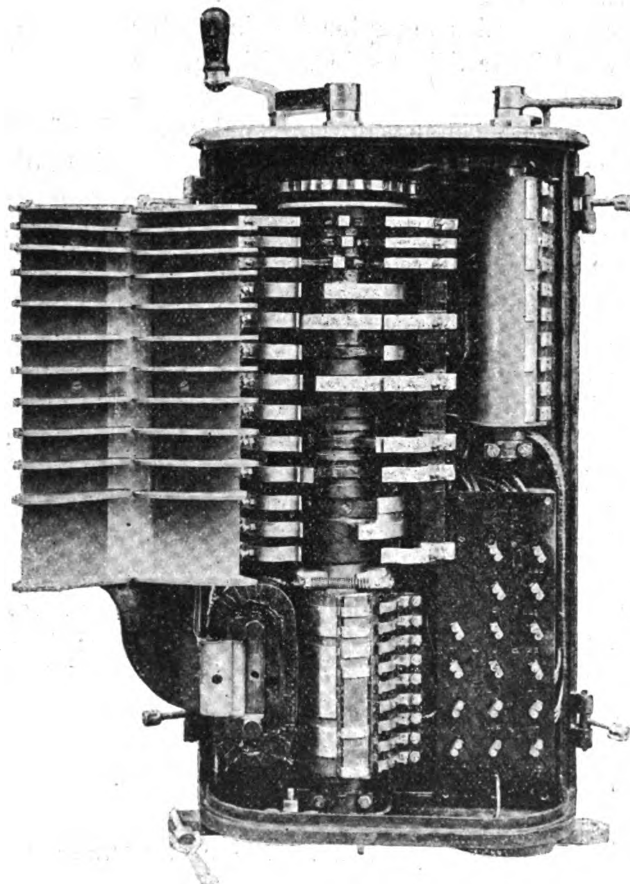


Fig. 1. — Contrôleur Raworth.

Le principe de la récupération du courant est connu depuis longtemps; il est extrêmement simple, maison s'est heurté généralement à des difficultés de construction qui n'ont pas permis de faire des applications de moteurs à récupération répondant aux besoins de la pratique journalière. Cela tenait principalement à ce que, dans les moteurs à excitation shunt employés, la ligne de commutation n'était pas fixe, et à ce que les variations de courant produites par un champ indépendant des variations du courant principal provoquaient de nombreuses étincelles, ce qui amenait l'usure rapide des balais.

On essaya alors d'employer des moteurs à récupération où l'on combinait les excitations série et shunt : il suffisait que l'enroulement série fût assez faible vis-à-vis de l'enroulement

shunt. Mais lorsque le courant retourne à la ligne, l'enroulement série tend à désaimanter les inducteurs, et de son action antagoniste, il résulte une réduction et même parfois une annulation complète des effets de récupération. C'est là un inconvénient capital : pour y remédier, on peut interrompre le courant dans l'enroulement série, ou bien le renverser lorsque la voiture descend des pentes, mais cette méthode exige une grande attention de la part du conducteur. Au surplus la voiture reçoit de violentes secousses, désagréables pour les voyageurs et nuisibles à la conservation du matériel.

Tous ces essais furent dès lors abandonnés et on s'en tint au système ordinaire de traction par moteurs « en série-parallèle ». Avec ce système, comme on le sait, on obtient également un excellent démarrage (toutefois moins instantané qu'avec le système shunt à récupération) et par suite l'entraînement rapide de la voiture. Mais pour accroître la sécurité des voyageurs, on a dû multiplier les dispositifs mécaniques de freinage, car on ne dispose d'aucun moyen automatique de retenir la voiture en restituant du courant au réseau.

Les essais effectués récemment à Londres avec le système Raworth reposent sur l'emploi de moteurs shunt et d'un type de contrôleur approprié.

Un moteur à excitation shunt tourne à une vitesse parfaitement définie pour chaque intensité du champ, et la vitesse du moteur varie en raison inverse de l'intensité du champ. Supposons qu'une voiture monte une pente, à une vitesse déterminée, avec un courant d'excitation de x ampères ; si on maintient ce courant d'excitation, la voiture descendra la même pente avec une vitesse sensiblement égale, mais elle aura une tendance à entraîner le moteur à une vitesse supérieure à celle qui correspond à l'excitation produite par les x ampères. Il s'ensuit que la force contre-électromotrice des moteurs dépassera la f. é. m. de la ligne ; les moteurs deviendront générateurs, restituant ainsi du courant au réseau en freinant automatiquement la voiture. Ce courant restitué variera avec le poids de la voiture, avec la pente et avec la vitesse acquise. — Une voiture de dix tonnes par exemple descendant une pente de 10 °/₀ à la vitesse de seize kilomètres à l'heure pourra restituer 63 ampères à la ligne sous 500 volts. Dans le cas de pentes plus fortes et de voitures plus lourdes, la récupération sera beaucoup plus grande.

Quant au contrôleur (fig. 1), il est construit de façon à assurer une grande sécurité dans la conduite de la voiture et à éliminer la possibilité d'accidents résultant de l'inattention ou de la négligence du personnel. Il est d'un aspect analogue à celui du contrôleur série-parallèle bien connu. Comme ce dernier, il est muni de deux manettes : l'une, petite, qui donne le sens de marche et l'autre, grande, qui effectue toutes les autres opérations. La partie supérieure est divisée en deux portions, où s'établissent les connexions principales des courants d'induit et d'inducteur. Un tambour plus petit, situé dans la partie inférieure, établit les connexions pour les excitations série et leurs résistances. Ce petit tambour ne fonctionne par conséquent que lorsque l'index de la manette, placé à 180° de la poignée, passe sur les divisions de freinage et de mise en parallèle. Les trois secteurs inférieurs du tambour supérieur sont fous sur l'axe, mais pour un angle de 30° seulement correspondant à l'espacement de trois divisions du cadran ; les contacts établis par ces secteurs sont donc toujours décalés de 30° en arrière du mouvement du tambour principal. C'est grâce à l'action de ces secteurs flottants que les contacts obtenus pendant le déplacement de la manette dans un sens diffèrent de ceux qu'on obtient en ramenant la manette en sens inverse. Un dispositif à frottement empêche l'entraînement de ces parties mobiles par le seul glissement de l'axe. Le contrôleur est muni d'un souffleur magnétique actionné par le courant d'excitation shunt ; toutefois la bobine possède un enroulement série qui entre en service pendant la période

de freinage rhéostatique. Enfin un dispositif de sécurité empêche qu'on puisse tourner la grande manette quand l'inverseur n'est pas dans une de ses positions de marche, avant ou arrière ; de même, on ne peut plus déplacer l'inverseur de marche, dès que la manette principale a quitté la position d'arrêt complet. Dans cette position aucune connexion n'est établie dans le controller. Voici, du reste, la suite des opérations :

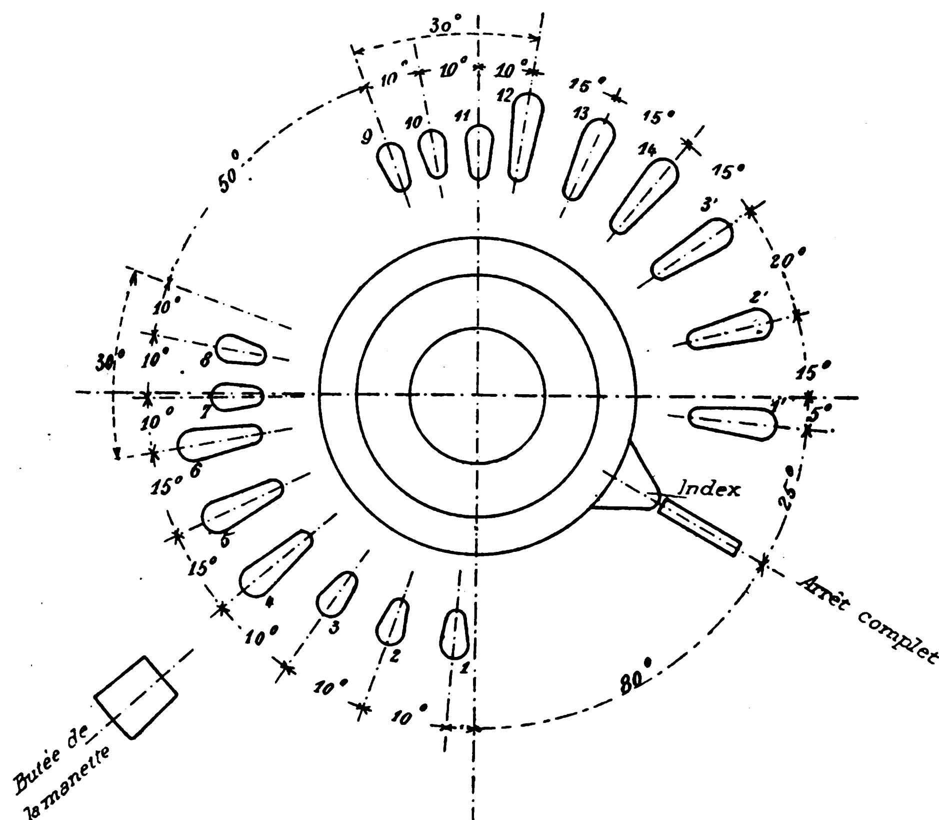


Fig. 2. — De 1 à 14, positions de marche; 1', 2', 3', positions de freinage d'urgence; de 1 à 6, marche en série; de 12 à 14, marche en parallèle.

Entre la position d'arrêt et la première division (fig. 2), le champ d'excitation shunt prend sa valeur maximum en supprimant graduellement une résistance. Sur les trois premières divisions, les induits sont reliés en série à travers une résistance qu'on coupe graduellement sur la deuxième et la troisième position. Sur la quatrième division, la vitesse de régime est minima, l'excitation shunt étant maxima. Si la voiture tend à marcher plus vite, il y a récupération automatique. Sur les deux divisions suivantes (5 et 6) on diminue le champ. Les divisions 7, 8 n'entraînent aucune modification. — Les enroulements série n'ont pas servi jusqu'ici. On ramène alors l'excitation à son maximum. Sur la neuvième division, les deux induits sont placés en parallèle, chacun étant mis en série avec des résistances. Les enroulements série de l'excitation sont constitués par un grand nombre de tours de fil relativement fin et destinés à donner un champ suffisant pour le freinage rhéostatique et à équilibrer les charges des deux moteurs mis en parallèle. Dans les dixième et onzième positions, la résistance en série avec les induits est graduellement coupée, le champ conservant sa valeur. Sur la douzième division les induits et les excitations sont reliés au réseau directe-

ment. Enfin dans les deux dernières positions (13 et 14) les connexions d'induit ne changent pas, mais on diminue le champ pour accroître la vitesse des moteurs. Au retour, les opérations se font en sens inverse, sauf qu'entre les positions 11 et 9 les connexions ne sont pas modifiées grâce aux secteurs flottants. Sur la division 8 les moteurs sont mis en série à travers une résistance et l'excitation shunt affaiblie. Sur la division 7 on coupe une partie de la résistance en série avec les induits, l'excitation shunt ne variant pas.

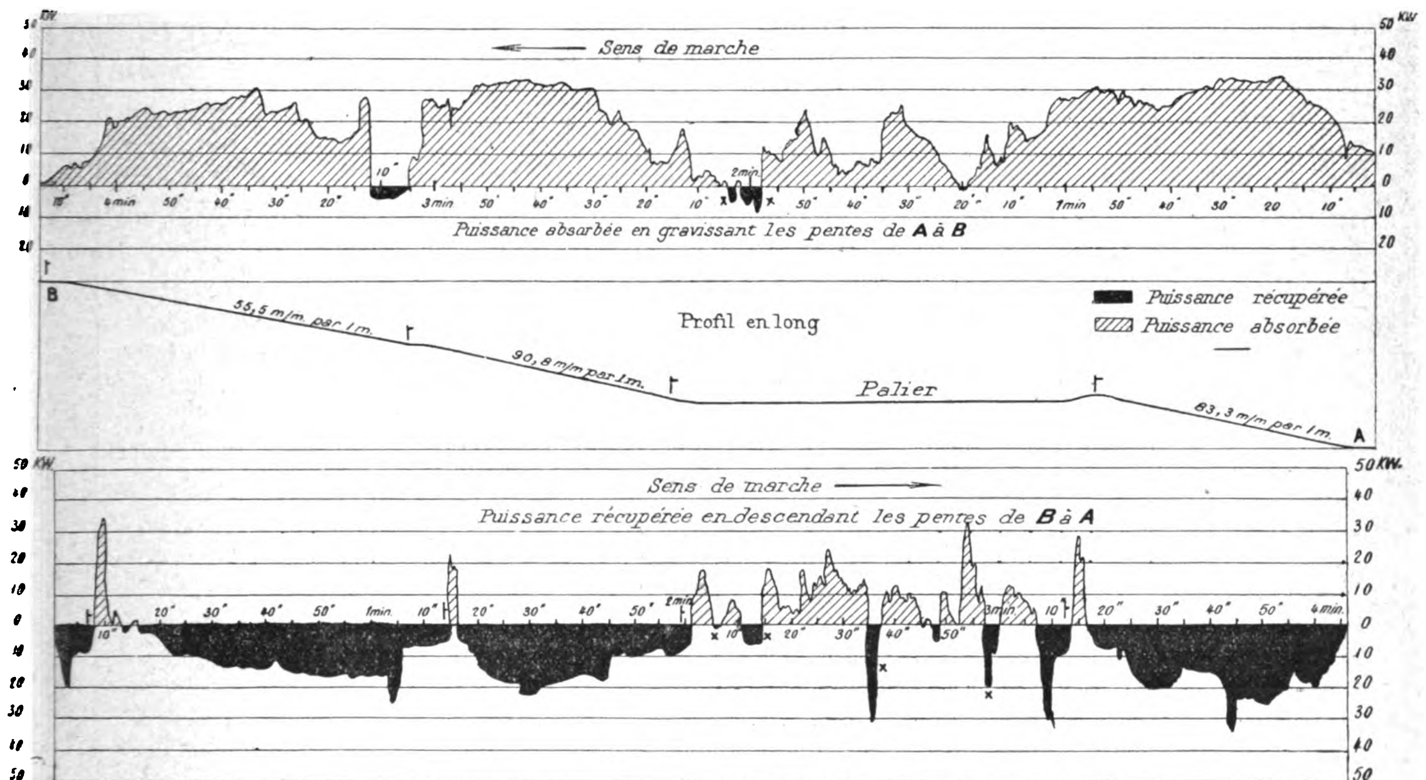


Fig. 3. — Courbes relevées au wattmètre enregistreur montrant la puissance absorbée et la puissance récupérée par une voiture de 9 tonnes avec 1 tonne 1/4 de poids mort munie du contrôleur à récupération automatique Raworth.

Il reste à examiner maintenant les opérations de freinage. — Dans la position 1′ les moteurs sont en série à travers leurs enroulements série et reliés à la terre avec une résistance en circuit. Dans la position 2′, une partie de cette résistance est supprimée et dans 3′ toute la résistance est enlevée, les induits étant en série et court-circuités à travers leurs enroulements d'excitation série. L'excitation shunt n'a pas d'action pendant cette période de freinage, qui s'effectue indépendamment de la ligne et qui se produit par conséquent même si le trôlet à quitté la ligne, ou encore si l'interrupteur de la station s'est ouvert pour un motif quelconque.

Le dispositif que nous venons de décrire est employé déjà sur de nombreux réseaux de tous profils dont quelques-uns présentent même de réelles difficultés de parcours. Citons en particulier le réseau de la Ville de Birmingham, celui de la Compagnie des Tramways du Yorkshire Woollen District et celui de la Compagnie des Tramways South Metropolitan. C'est, d'ailleurs, sur la ligne du Crystal Palace, desservie par cette dernière compagnie, qu'ont eu lieu les essais effectués en juin devant les ingénieurs venus pour le Congrès de Londres.

***

Nous donnons ces résultats. Les mesures ont été prises (fig. 3) sur deux wattmètres B. T. H. de 75 ampères qui ont été installés successivement sur deux voitures identiques sauf en ce qui concerne l'appareillage électrique. L'une était du modèle Brush, muni du système « Série Parallèle » ordinaire, l'autre était équipée avec les dispositifs Raworth à récupération. Le nombre et la durée des arrêts ont été les mêmes dans les deux cas.

ROUTE	VOITURE N° 4 A RÉCUPÉRATION LECTURES		VOITURE N° 10 S. P. BRUSH LECTURES	
	Récupération.	Consommation.	Consommation.	Consommation.
Selby Road.	210,3	22,0	36,8	17,0
Penge.	210,7	24,1	39,1	19,3
Selby Road.	211,0	25,7	41,0	21,1
Différence entre lectures extrêmes. .	,7	3,7	4,2	4,1
Kilowatts nets.	3,	»	Kilowatts moyens.	4,15
Kilomètres.	5,088	»	Kilomètres.	5,088
Kilowatts par kilomètre.	0,590	»	Kilowatts par kilomètre. . . .	0,815
Selby Road.	211,0	25,8	31,6	12,0
Crystal Palace.	211,0	29,4	35,7	16,0
Selby Road.	212,2	30,8	39,6	16,9
Différence entre lectures extrêmes. .	1,2	5,0	5,0	4,9
Kilowatts nets.	3,8	»	Kilowatts moyens.	4,95
Kilomètres.	5,297	»	Kilomètres.	5,297
Kilowatts par kilomètre.	0,717	»	Kilowatts par kilomètre. . . .	0,935
Moyenne des kilowatts dépensés en marche récupérative par kilomètre.	0,653	»	Moyenne des kilowatts dépensés en série-parallèle par kilomètre.	0,875
Économie réalisée.			25,4 %	

On a également relevé des diagrammes au moyen d'ampèremètres enregistreurs (fig. 4) pour

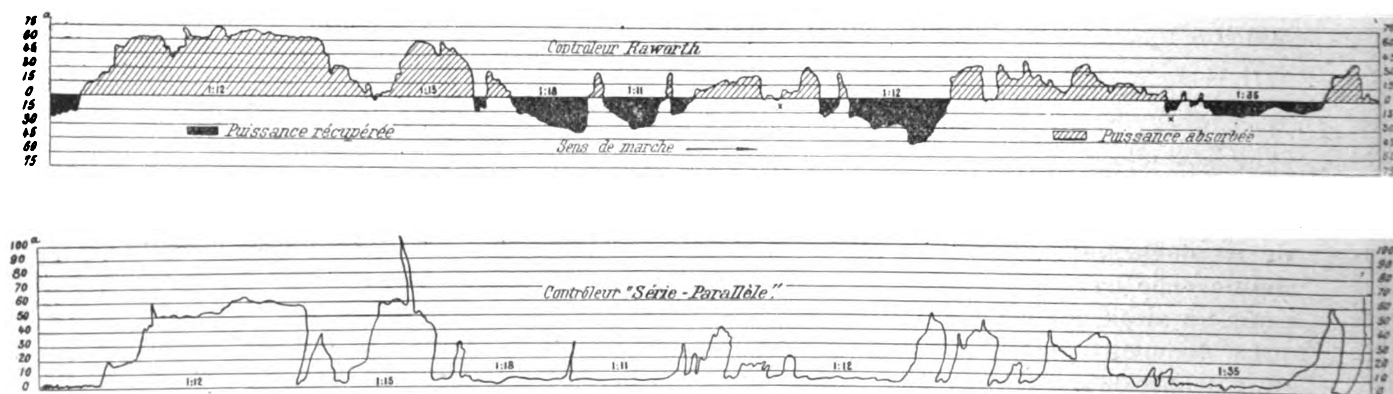


Fig. 4. — Courbes relevées à l'ampèremètre enregistreur montrant les consommations d'une voiture de 9 tonnes avec 1 tonne 1/4 de poids mort, équipée : 1° avec contrôleur à récupération automatique Raworth ; 2° avec contrôleur « Série Parallèle ».

l'étude comparative de la marche en récupération et de la marche ordinaire. Ces courbes

sont très instructives. Les fluctuations violentes, surtout à la mise en parallèle, sont évitées. En cours de route le passage de la marche en moteur à la marche en génératrice se fait sans à-coup et les freinages sont très élastiques. Les essais ont mis d'autre part en évidence une grande économie de consommation de courant en faveur de ce système de traction. Ils ont été effectués à la station génératrice de Yardley qui fournit le courant à la Compagnie des Tramways du District de Birmingham et Midland. Cette station alimente une partie du réseau où circulent 41 voitures à récupération.

L'énergie est fournie par quatre moteurs Diesel de 160 chevaux chacun. — Aux heures les plus chargées les quatre moteurs fonctionnaient avant l'adoption du système à récupération. Depuis, trois moteurs au plus sont nécessaires et le quatrième peut éventuellement servir de secours.

Enfin un avantage qu'il convient aussi de signaler dans ce système de traction, c'est la sécurité de marche. La voiture ne peut s'emballer. Le freinage électrique, en effet, est infaillible tant que les moteurs ne sont pas dérangés, ce qui n'est pas le cas avec des moteurs série disposés pour actionner le frein électromagnétique.

Ce système de traction à récupération, qui a déjà donné d'excellents résultats, nous a semblé d'autant plus intéressant qu'il peut s'appliquer très simplement aux moteurs de traction avec une légère modification de l'excitation.

A. Solier.

REVUE INDUSTRIELLE ET SCIENTIFIQUE

THÉORIES ET GÉNÉRALITÉS

***Effets de la self-induction dans un cylindre en fer.* — E. Wilson.** — *The Electrician*, 20 juillet 1906.

Si l'on divise un conducteur cylindrique en conducteurs tubulaires concentriques, la théorie ordinaire de la self-induction et de l'induction mutuelle montre que, quand le conducteur est soumis à une différence de potentiel alternative, les couches intérieures sont le siège de courants électriques de densités plus faibles que les couches extérieures, et les courants subissent un décalage plus grand auprès du centre du cylindre. La théorie montre que la perméabilité et la conductibilité jouent un rôle important dans ces phénomènes, dont l'amplitude augmente avec ces deux facteurs. Quand le conducteur présente une perméabilité variable, le problème devient plus compliqué ; l'auteur s'est proposé d'examiner en particulier ce qui se passe dans un cylindre en fer quand on y inverse des courants électriques et que l'on maintient ces courants constants après l'inversion. La seconde partie de cette étude est consacrée au cas de courants alternatifs de différentes fréquences et de différentes formes d'ondes.

Le cylindre employé était en acier doux et avait un diamètre de 25^{cm},4. Il était muni de trous percés dans un plan contenant l'axe de figure : des bobines d'exploration pouvaient être placées, au nombre de trois, dans ces trous. Chacune d'elles avait 5 centimètres de largeur dans une direction parallèle à l'axe de figure, une hauteur radiale de 2,5, 5 et 5 centimètres et un rayon moyen de 1,25, 5 et 10 centimètres. Les bobines sont numérotées 1, 2, 3, la bobine 1 étant voisine du centre du cylindre. Ce cylindre portait, suivant son axe, un trou de 0^{mm},6. À chacune de ses extrémités était une projection massive servant à amener le courant dans le cylindre. Les conducteurs connectés à ces projections étaient reliés à un inverseur établi de telle façon que, dans sa position médiane, il court-circuitât le circuit du cylindre et de ses conducteurs. Le courant électrique était fourni par des accumulateurs et traversait une résistance réglable et le shunt d'un ampèremètre. La diffé-

rence de potentiel agissante et la résistance réglable étaient telles que, quand on inversait le courant dans le cylindre, sa valeur dans le circuit principal restait constante. En fait, l'inversion du courant principal était pratiquement instantanée. L'instant de l'inversion était noté sur une montre à secondes et, deux secondes après l'inversion, on notait les déviations du galvanomètre en circuit avec les bobines d'exploration. Les déviations étaient réduites en volts par tour par centimètre carré de bobine, et portées en fonctions de temps. Les courbes ainsi obtenues furent intégrées pour trouver la valeur moyenne maxima de l'induction. Ces valeurs sont données dans le tableau I.

TABLEAU I

COURANT TOTAL dans le cylindre.	BOBINE N° 1		BOBINE N° 2		BOBINE N° 3	
	H MOY.	B MOY. MAX.	H MOY.	B MOY. MAX.	H MOY.	B MOY. MAX.
950	1,68	2,640	4,5	8,950	6,0	9,640
670	1,18	1,620	3,15	7,300	4,2	8,200
522	0,924	1,040	2,48	6,000	3,3	7,080
424	0,75	660	2,01	4,610	2,68	6,210
356	0,627	540	1,69	3,560	2,25	5,420
240	0,426	200	1,14	1,840	1,52	3,420
210	0,372	»	0,998	1,350	1,33	2,520
160	0,283	100	0,758	773	1,01	1,400
123	0,218	68	0,583	473	0,777	739
80	0,141	40	0,379	247	0,505	415
45	0,079	»	0,213	136	0,284	180

Densité de courant. — Si la densité de courant dans la section droite du cylindre est constante, la force H doit varier avec le rayon. Si l'on porte la valeur de B pour la bobine 3 (tableau I) en fonction des courants totaux inversés dans le cylindre, on trouve une courbe ressemblant à la courbe BH d'un morceau d'acier doux. Si l'on porte la valeur de B des bobines 2 et 1 en fonction de courant total multiplié par 0,5 et 0,125 (pour correspondre à leurs rayons), on voit que, quoique semblables, les trois courbes ne peuvent pas se superposer. Pour que la superposition puisse être faite, il faut multiplier les courants totaux par 0,75 et 0,28 respectivement. Cela semble montrer que, dans des conditions constantes, la densité de courant est plus grande au voisinage du centre qu'au voisinage de la surface. Les densités moyennes relatives semblent être les suivantes :

1) Sur la surface du cylindre avec le rayon moyen de la bobine 1 : 0,56 ;

2) Sur l'anneau entre les rayons moyens des bobines 1 et 2 : 0,36 ;

3) Sur l'anneau entre les rayons moyens des bobines 2 et 3 : 0,21.

Un courant total de 950 ampères correspond à une force moyenne H d'environ 6 unités C. G. S. pour la bobine n° 3, et la courbe BH pour l'acier doux est bien représentée par les résultats de l'expérience. La relation entre la valeur moyenne de H pour chacune des bobines et le courant total est donné sur le tableau I.

Comparaison des courbes de forces électromotrices. — Les courbes de la bobine n° 3 présentent un seul maximum très aigu ; cependant, pour l'inversion des courants d'intensité supérieure à 400 ampères, elles manifestent une tendance à un second maximum 20 secondes après l'inversion du courant. Au delà de 400 ampères, on voit que, quand le courant total augmente, les courbes se coupent à des intervalles plus petits, ce qui montre que les effets pénètrent plus rapidement après que l'induction moyenne maxima a dépassé la valeur à laquelle se produit le maximum de perméabilité. La bobine n° 2 présente, d'une façon beaucoup plus marquée, l'existence d'un second maximum : quand le courant total dans le cylindre est faible, il n'y a pas de second maximum. A partir de 200 ampères environ, le second maximum se manifeste et devient très important pour les intensités de courant plus élevées. Comme dans le cas de la bobine n° 3, les courbes se coupent à des intervalles plus restreints à partir de 420 ampères environ. La bobine n° 1 présente des effets semblables, mais le maximum de la f. é. m. est atteint plus tard. En outre, l'intervalle de temps compris entre le premier et le second maximum est plus grand que dans le cas de la bobine 2. Ces résultats confirment ceux obtenus précédemment dans le cas d'inversion de courant dans une bobine de cuivre enveloppant des cylindres de 10 et 30 centimètres de diamètre et dans le cylindre d'acier tournant dans un champ magnétique.

Le tableau II indique les durées de renversement de l'aimantation au centre des cylindres de 10 et 30 centimètres de diamètre quand le courant dans les bobines magnétisantes est instanta-

nément inversé, puis maintenu constant. Dans ces deux cas, les durées varient à peu près comme le carré des diamètres des cylindres. Les résultats obtenus dans les expériences actuelles sont aussi indiqués sur le tableau II.

TABLEAU II

ÉLECTRO-AIMANT DE 10cm		ÉLECTRO-AIMANT DE 30cm		CYLINDRE DE 25cm			
				Durée en secondes			
Durée en secondes.	H max.	Durée en secondes.	H max.	Bobine n° 1.	Bobine n° 2.	Bobine n° 3.	Courant total dans le cylindre.
40	1,7	360	1,2	»	20	»	45
45	3,0	420	2,4	20	28	15	80
33	4,96	180	6,0	30	48	30	160
10	16,0	80	11,0	58	80	50	210
5	37,0	50	24,0	75	100	»	240
»	»	»	»	116	112	60	356
»	»	»	»	120	120	50	424
»	»	»	»	190	90	»	522
»	»	»	»	90	75	40	670
»	»	»	»	90	65	30	950

En intégrant les courbes de force électromotrice, l'auteur a trouvé que la valeur moyenne du flux magnétique, pour des courants totaux supérieurs à 240 ampères environ, change de signe pour la bobine 2 après avoir changé de signe pour la bobine 1. Pour des courants d'intensité supérieure à 240 ampères, les courbes coupent l'axe des temps dans l'ordre 3, 2, 1.

Applications des résultats à d'autres sections. — Si l'on compare deux cylindres dont les diamètres sont comme 1 et n, la valeur de H à des rayons semblables est la même si les courants totaux sont dans le rapport de 1 à n. Si l'on considère l'unité de longueur des deux cylindres, l'induction magnétique totale en deux rayons semblables varie comme n et la résistance électrique des circuits longitudinaux semblablement placés varie comme $1/n^2$. Aussi, pour induire n fois le courant dans ces circuits, la f. é. m. doit varier dans le rapport de 1 à n. Si le temps varie comme n^2, les f. é. m. varient comme $1/n$, et donnent une même valeur de la force magnétique H en des rayons semblables.

Dans une récente étude relative à la self-induction des rails (1), l'auteur a montré combien la self-induction varie avec la fréquence pour un courant donné, et avec le courant pour une fréquence donnée. La hauteur d'un des rails est approximativement équivalente à un cylindre de 5 centimètres de diamètre. Un courant de 100 ampères dans un tel cylindre correspond à 500 ampères dans le cylindre de 25 centimètres de diamètre si les forces aux rayons semblables sont les mêmes. R. R.

(1) *Eclairage Electrique*, tome XLVII, 14 avril 1906, p. 63.

***Sur la variation de résistance des fils de palladium contenant de l'hydrogène occlus.* — F. Fischer.** — *Drudes Annalen*, 7 juillet 1906.

On sait que, par électrolyse, on peut faire absorber au palladium, par occlusion, une quantité considérable d'hydrogène, dont le volume peut dépasser 1 000 fois le volume du fil.

L'auteur a fait un certain nombre d'expériences pour déterminer la variation de résistance électrique des fils de palladium avec la quantité d'hydrogène occlus par ces fils. Les résultats qu'il a obtenus sont les suivants :

1° La résistance électrique d'un fil de palladium croît avec l'occlusion des premières quantités d'hydrogène : cette augmentation est immédiate et rapide. La valeur de l'augmentation diminue ensuite peu à peu et devient proportionnelle à la quantité d'hydrogène occlus pour une teneur de 30 volumes environ (c'est-à-dire de 30 fois le volume du fil). Quand le fil a absorbé 950 fois son volume d'hydrogène, la résistance croît de moins en moins vite, et cet accroissement n'est plus proportionnel à l'augmentation d'hydrogène occlus.

2° Un fil de palladium saturé contient environ 1 000 fois son volume d'hydrogène.

3° La sursaturation d'hydrogène ne produit pas de variation de résistance. L'hydrogène occlus en sursaturation se dégage librement à nouveau sans provoquer de variation de résistance.

4° La résistance d'un fil de palladium croît au maximum dans le rapport 1,69 par suite de l'occlusion d'hydrogène : on a, pour le rapport de la résistance mesurée w à la résistance initiale w_0 de 30 volumes à 950 volumes

$$w/w_0 = a + bH,$$

relation dans laquelle

$$a = 1{,}0292 \quad \text{et} \quad b = 0{,}000668,$$

H désignant le nombre de volumes pour lequel on veut calculer la valeur de w/w_0.

5° Le rapport de la résistance atteinte à un moment quelconque de l'occlusion par un fil de palladium à la résistance du fil de palladium non traité ne dépend que de la quantité d'hydrogène occlus.

6° L'extension longitudinale d'un fil de palladium lors de l'occlusion de l'hydrogène est directement proportionnelle, jusqu'à la limite de saturation, à la quantité d'hydrogène absorbée : elle est de 0,00002539 pour chaque volume d'hydrogène.

7° La sursaturation d'hydrogène produit un allongement relativement plus grand.

8° Les raccourcissements du fil qui suivent les allongements lorsque l'hydrogène se dégage ou entre en combinaison avec des composés oxygénés sont plus grands que les allongements. A la fin de l'expérience, le fil est plus court qu'au début : par contre, sa résistance électrique est restée la même.

R. V.

GÉNÉRATION ET TRANSFORMATION

Sur la répartition du flux dans une machine à pôles auxiliaires. — **R. Pohl.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 26 juillet 1906.

Le Pr Arnold a publié une série de mesures magnétiques intéressantes faites sur une machine bipolaire à pôles auxiliaires (1). D'après ces mesures, il conclut que la répartition du flux indiquée par l'auteur (2) n'est pas exacte et il donne une autre représentation de la répartition du flux magnétique, en recommandant, pour les calculs, la superposition des flux individuels.

L'auteur n'admet pas cette conclusion et s'efforce de montrer que sa façon de voir est exacte physiquement, qu'elle concorde bien avec les résultats expérimentaux, et qu'elle donne une base utile pour des avant-projets.

Il fait remarquer d'abord que si l'on considère la figure 5, page 226 (12 mai 1906) et si l'on remplace 2B par N_H et A — B par N_N ou $N_N + N_u$, flux de commutation, on retombe sur la représentation qu'il a donnée, la figure indiquée par Arnold ne différant de la sienne que par l'introduction d'un angle α nommé rotation de l'axe magnétique des pôles principaux. Or l'auteur trouve qu'en réalité la présence de pôles auxiliaires ne produit pas de rotation de l'axe magnétique des pôles principaux et de distorsion du champ. Il s'appuie sur le fait que chaque pôle de commutation peut être considéré comme une portion décalée du pôle principal de même nom, en admettant que les nombres d'ampère-tours correspondants ne soient pas trop différents.

La figure 1 indique schématiquement ce dispositif. Le flux de commutation se referme par

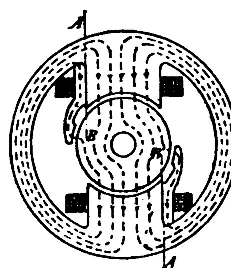


Fig. 1.

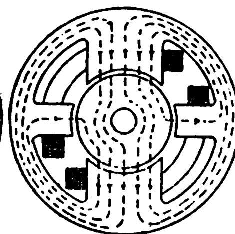


Fig. 2.

le pôle principal de polarité opposée : il en est de même du flux de dispersion non figuré. Les pôles de commutation n'influent pas sur la répartition des lignes de force dans le pôle principal lui-même, dans l'entrefer ni dans les dents. Si l'on se représente les pôles de commutation coupés suivant les lignes AB et A'B' (fig. 1) et déplacés, l'excitation restant toujours commune, on obtient le dispositif représenté par la figure 2 Rien n'est changé aux conditions magnétiques. On peut, en outre, séparer les excitations comme l'indiquent les figures 3 et 4, et rien n'est encore

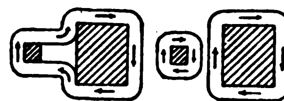


Fig. 3 et 4.

changé dans le trajet et la répartition des lignes de force, tant que le nombre d'ampère-tours reste le même sur le pôle principal et sur le pôle auxiliaire. On arrive ainsi au montage ordinaire d'une machine à pôles de commutation, et l'on voit qu'il ne se produit pas de rotation de l'axe magnétique des pôles principaux et pas de distorsion des flux. Si l'on examine superficiellement la répartition des lignes de force dans la figure 2, on peut conclure qu'il existe une distorsion des

(1) *Éclairage Électrique*, tome XLVII, 12 mai 1906, page 223.

(2) *Éclairage Électrique*, tome XLIV, 8 juillet 1905, page 26.

flux dans l'induit. Il se produit évidemment un décalage de l'axe géométrique du flux total d'une polarité (N et *n* ou S et *s* considéré dans son ensemble), de sorte que les points d'induction maxima dans l'induit sont décalés d'une façon correspondante, mais le flux des pôles principaux traverse toujours l'induit, l'entrefer et les dents avec la même répartition uniforme que quand il n'y a pas de pôle auxiliaire. Ce n'est qu'en charge qu'il se produit une distorsion due, comme d'ordinaire, aux ampère-tours de réaction d'induit.

La figure montre aussi qu'une bobine placée sous le milieu du pôle principal est traversée, lorsque le pôle auxiliaire est excité, par un faisceau de lignes de force égal au flux utile du pôle auxiliaire.

L'auteur indique que les résultats des expériences d'Arnold sur la grandeur du flux de dispersion et son influence sur la condition de saturation des pôles auxiliaires présentent beaucoup d'intérêt et confirment les résultats théoriques auxquels il avait été conduit. On peut, d'ailleurs, relever la courbe de saturation des pôles auxiliaires en traçant leur caractéristique à vide quand les pôles principaux ne sont pas excités et avec les balais décalés de 90° (à condition que les pôles de commutation soient symétriquement placés par rapport aux pôles principaux). Pour éviter une saturation prématurée, il faut que le flux de dispersion ait une faible valeur, et sa prédétermination est un des points les plus importants.

L'auteur n'admet pas, à ce point de vue, les résultats auxquels est parvenu Arnold. Le flux de dispersion, se dirigeant, comme le flux de commutation, vers les deux pôles principaux, il y a lieu de tenir compte des surfaces polaires sans se préoccuper de leur polarité : il est en outre inutile d'augmenter la distance entre les pôles principaux et auxiliaires de polarité différente et de diminuer la distance entre les pôles principaux et auxiliaires de même nom.

Les figures 1 et 2 montrent, au contraire, qu'il ne se produit pas de dispersion entre les surfaces de même polarité des pôles placées vis-à-vis l'une de l'autre. Le flux de dispersion se dirige aussi vers le pôle de polarité opposée. On voit, en outre, que la dispersion doit être d'autant plus faible que la distance du pôle principal de nom contraire est plus grande. D'ailleurs, la superposition des flux conduit au même résultat ; il suffit de considérer que le flux de dispersion de pôles auxiliaires dissymétriques se ferme en partie par les pôles principaux non excités.

Pour le calcul de la dispersion, il faut introduire par suite la somme des ampère-tours du pôle principal et du pôle auxiliaire et la réluctance magnétique exacte. Les pôles et les masses polaires doivent être traités séparément. En outre, la dispersion vers le pôle principal de même nom, produite par une différence d'excitation, doit entrer en ligne de compte.

Pour le calcul de la partie magnétisante des ampère-tours du pôle auxiliaire et de la courbe de saturation, il suffit de connaître la réluctance magnétique dans le pôle auxiliaire, dans l'entrefer et dans les dents sous ce pôle : le reste est relatif aux ampère-tours du pôle principal. Le noyau de l'induit et la culasse ont toujours des réluctances négligeables.

R. V.

***Sur la répartition du flux dans une machine à pôles auxiliaires.* — E. Arnold.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 26 juillet 1906.

L'auteur répond aux critiques du Dr Pohl. Il indique que la méthode de superposition du flux donne une image exacte de la répartition du flux tant que la saturation du fer est faible, et qu'elle montre très simplement et exactement que le flux des pôles principaux n'est pas modifié, sans qu'il soit nécessaire de considérer les pôles auxiliaires comme des portions décalées des pôles principaux. Si l'on choisit le dispositif symétrique ordinaire, dans lequel les conductibilités des branches parallèles du circuit magnétique sont égales, aussi bien pour le flux principal que pour le flux de dispersion, on obtient la représentation schématique de la figure 1, où

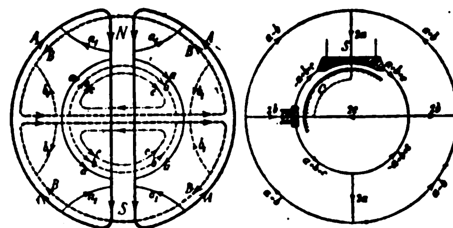


Fig. 1. Fig. 2.

A et *a* désignent le flux principal et le flux de dispersion des pôles principaux, B et *b* le flux

principal et le flux de dispersion des pôles auxiliaires, et c le flux transversal produit par les ampère-tours de l'induit. Le flux de dispersion allant d'un pôle à la culasse est désigné par a_1 ou b_1. Par suite de la symétrie complète, les flux principaux sont indépendants l'un de l'autre et le flux de dispersion des pôles de commutation ne peut pas modifier le flux des pôles principaux et, inversement, le flux de dispersion des pôles principaux ne peut pas modifier le flux des pôles auxiliaires. Si l'on considère seulement les flux de dispersion intérieurs, parmi lesquels il faut compter aussi le flux transversal c, on obtient comme figure résultante de la dispersion la figure 2, dans laquelle on suppose que le flux de dispersion des pôles auxiliaires se dirige vers les deux pôles principaux, et que inversement le flux de dispersion des pôles principaux se dirige vers les deux pôles de commutation.

Si les pôles auxiliaires ne sont pas symétriquement placés par rapport aux pôles principaux, on peut tenir compte de cette dissymétrie en faisant tourner le flux Bb et c par rapport aux flux Aa. Dans ce cas, il vaut mieux superposer séparément au flux principal le flux de commutation pour chaque pôle. La figure que l'on obtient ainsi montre que les réluctances magnétiques pour les flux principaux A et B restent à peu près invariables ; par contre, la réluctance opposée aux flux de dispersion est plus faible dans deux régions interpolaires que dans les deux autres.

Soient AW_l et AW_z les ampère-tours d'un circuit magnétique pour l'entrefer et les dents, τ_1 et τ_2 les longueurs d'arc entre le pôle auxiliaire et le pôle principal, AC la charge linéaire de l'induit. Si l'on forme l'intégrale linéaire de la force magnétique le long de la courbe C (fig. 2) entre le milieu de la surface polaire d'un pôle principal jusqu'au milieu de la surface polaire d'un pôle auxiliaire, en passant par l'induit, on obtient entre deux pôles de même nom, en négligeant les ampère-tours nécessaires pour le moyen de l'induit, la valeur :

$$\frac{1}{2}(AW_l + AW_z)_H - \tau_1 \cdot AC - \frac{1}{2}(AW_l + AW_z)_W,$$

l'indice H se rapportant au pôle principal et l'indice W au pôle de commutation. Entre deux pôles de nom contraire, l'on a :

$$\frac{1}{2}(AW_l + AW_z)_H + \tau_2 \cdot AC + \frac{1}{2}(AW_l + AW_z)_W.$$

Ces ampère-tours produisent le flux de dispersion entre les masses polaires. Au premier terme correspond le flux de dispersion a, au second terme le flux transversal c et au troisième terme le flux de dispersion b.

La façon de voir de l'auteur, d'après laquelle le flux de dispersion se dirige vers les deux pôles principaux, s'applique non seulement aux flux individuels mais aussi au flux résultant.

L'utilité qu'il peut y avoir à diminuer la distance interpolaire entre les pôles de même nom et à l'augmenter entre les pôles de nom contraire est étudiée d'une façon détaillée par l'auteur. Sur la dispersion dans les espaces interpolaires 1 et 3 agit une différence de forces magnétomotrices ; sur la dispersion dans les espaces 2 et 4 agit au contraire une somme de forces magnétomotrices. Si donc l'on diminue la réluctance dans les espaces 1 et 3 où la force magnétomotrice est la plus faible et qu'on l'augmente dans les espaces 2 et 4 où elle est plus forte, et si l'on tient compte que dans les espaces 2 et 4 les cornes polaires sont fortement saturées, tandis qu'elles le sont faiblement dans les espaces 1 et 3, on voit que la dispersion dans les espaces 1 et 3 peut augmenter plus (quoique τ_1 AC devienne plus petit) qu'elle ne diminue en 2 et 4 (où τ_2 AC devient plus grand). Il faut remarquer aussi que, pour les faibles charges, on a $a > b + c$: le flux de commutation est renforcé par le pôle principal de même nom voisin. Aux fortes charges, on a $a < b + c$ et le flux de commutation est affaibli par l'action transversale de l'induit. Si l'on suppose $(AW_l + AW_z)_H$ constant, la variation de dispersion dans un espace interpolaire dépend des ampère-tours

$$\frac{\tau}{2} AC + \frac{1}{2}(AW_l + AW_z)_W,$$

si l'on pose $\tau_1 = \tau_2 = \tau/2$. Par suite, pour une même perméabilité, la variation de dispersion serait la même dans tous les espaces interpolaires. Mais, par suite de la faible saturation des cornes polaires, la perméabilité entre des pôles de même nom est plus grande : il n'est donc pas inutile, mais au contraire il est avantageux de rapprocher plus les pôles de même nom que les pôles de nom contraire.

De ce qui précède, il résulte en outre que, quand on emploie des pôles auxiliaires, il est bon de maintenir aussi faible que possible la distorsion du flux principal, c'est-à-dire rendre

aussi grande que possible la réluctance des pôles principaux pour le flux transversal. L'entrefer ne doit donc pas avoir une valeur trop réduite.

Les machines à pôles de commutation et enroulement compensateur de Ryan ou de Déri-Leblanc doivent donc, pour les services très durs, présenter un fonctionnement beaucoup meilleur que les machines ordinaires à pôles de commutation contrairement à l'opinion exprimée par Pohl que la machine Déri ne vaut pas une machine non compensée à pôles auxiliaires bien établie. Des moteurs de laminoirs de 1 000 chevaux travailleraient dans de mauvaises conditions sans enroulement compensateur.

Il faut remarquer, en outre, que, pour une position dissymétrique des pôles de commutation, la répartition du flux de dispersion n'est plus celle de la figure 2. La différence des flux de dispersion $b_1 - b_4$ ou $b_2 - b_3$ des pôles auxiliaires produit une modification du flux des pôles principaux et la différence des flux de dispersion $a_1 - a_2$ et $a_3 - a_4$ des pôles principaux produit une modification du flux des pôles auxiliaires.

Pour le calcul des ampère-tours des pôles auxiliaires, Pohl n'envisage que la réluctance des pôles auxiliaires, de l'entrefer et des dents sous le pôle auxiliaire. Mais il est facile de voir, d'après la figure 1, que le flux des pôles auxiliaires augmente la saturation dans la culasse et dans le noyau de l'induit dans un quadrant et l'affaiblit dans l'autre quadrant. Cette modification de la saturation exige l'emploi d'un certain nombre d'ampère-tours sur le pôle de commutation. Pour des saturations élevées, ces ampère-tours peuvent atteindre une valeur importante, et il n'est plus possible de la négliger.

Pour la même raison, on ne peut pas obtenir la courbe exacte d'aimantation des pôles auxiliaires en décalant des balais de 90°, les pôles principaux n'étant pas excités, et en mesurant la f. é. m. induite par les pôles auxiliaires dans la machine à vide.

En terminant, l'auteur donne une explication des mouvements pendulaires constatés sur des machines munies de pôles de commutation. Ce phénomène se manifeste dans les moteurs quand les balais sont suffisamment déplacés en arrière hors du flux de commutation, de façon qu'une portion importante du flux de commutation agit comme antagoniste, c'est-à-dire induit une f. é. m. opposée à la f. é. m. induite par le flux principal. Si l'état d'inertie d'un tel moteur est détruit, pour une raison quelconque, de façon, par exemple, que le courant dans l'induit augmente d'intensité, le flux de commutation est renforcé, la force contre-électromotrice diminue et la vitesse croît : l'induit doit s'accélérer et le courant augmente encore plus, renforçant ainsi encore le flux de commutation. La vitesse de rotation croît jusqu'à ce que la diminution de la force contre-électromotrion cesse. Quand une certaine saturation de pôles auxiliaires est atteinte, la force contre-électromotrice augmente sous l'effet de la vitesse atteinte, et le phénomène inverse se produit. R. V.

***Influence de l'emploi de pôles de commutation sur le dimensionnement des moteurs à courant continu.* — C. H. Bedell.** — *American Institute*, juillet 1906.

Les pôles de commutation ont été employés pour établir des moteurs fonctionnant dans des conditions tellement dures que de bons résultats ne pouvaient pas être obtenus avec des moteurs du type normal. Particulièrement pour la commande des machines-outils, les constructeurs demandent des moteurs permettant des variations de vitesse de 1 à 5 qu'il est impossible de réaliser avec des moteurs ordinaires, à cause des crachements aux balais. On a donc senti la nécessité de réaliser un champ de commutation intense permettant le renversement du courant dans la bobine court-circuitée et variant avec la charge : ce champ de commutation doit donc, pour assurer une bonne commutation, être indépendant du champ principal.

Les excellents résultats obtenus, pour la construction de moteurs à vitesse variable, avec des pôles auxiliaires de commutation, ont conduit à adopter ce mode de construction, même pour les moteurs à vitesse constante. Les pôles auxiliaires sont excités en série par le courant induit. De cette façon, le flux de commutation augmente avec la charge de l'induit et diminue avec elle. Les ampère-tours des pôles de commutation doivent avoir une valeur beaucoup plus élevée que les ampère-tours de l'induit, puisqu'il faut non seulement neutraliser le flux de l'induit, mais encore produire un flux de commutation. Quel que soit le sens de rotation de l'induit et le sens du courant, l'action des pôles auxiliaires reste la même, et les balais, calés en face du milieu des

pôles auxiliaires, n'ont pas besoin d'être déplacés.

On peut se demander si l'excitation doit être la même sur les pôles auxiliaires, pour une charge donnée, pour une grande et faible vitesse de rotation. Les expériences ont montré que, si l'excitation a une valeur convenable pour les vitesses élevées, cette valeur convient aussi aux faibles vitesses. Quoique le flux produit par un pôle auxiliaire pour une charge donnée soit le même, quelle que soit la vitesse de rotation, la f. é. m. engendrée dans la bobine en court-circuit est proportionnelle à la vitesse de rotation : une force électromotrice élevée est donc produite pour les inversions brusques du courant aux grandes vitesses et une force électromotrice beaucoup plus faible est produite pour les inversions plus lentes aux faibles vitesses.

Pour déterminer la distribution exacte du champ dans un moteur à pôles auxiliaires, l'auteur a fait des mesures au moyen de balais d'exploration et d'un voltmètre autour du collecteur d'un moteur de 5 chevaux dont la vitesse de rotation était comprise entre 250 et 1 100 tours par minute. Il a tracé ainsi des courbes relatives à la faible vitesse et à la grande vitesse. A faible vitesse, la réaction d'induit est faible : aux grandes vitesses, elle est très importante, à tel point que la polarité de l'une des cornes polaires de chaque pôle principal est non seulement réduite à zéro, mais même inversée. La courbe est déformée et amenée du bon côté de l'axe des zéros par l'action des pôles auxiliaires : il y a un champ suffisant pour assurer une bonne commutation. Dans les expériences, les lectures du voltmètre sont proportionnelles à l'intensité du champ dans la région étudiée, sauf dans le voisinage immédiat du balai. La f. é. m. de self-induction de la bobine court-circuitée empêche que le voltage apparent trouvé en ce point au moyen de balais d'exploration soit proportionnel au champ magnétique.

Les pôles intérieurs produisent une bien meilleure forme de champ de commutation que celle obtenue dans les machines ordinaires par les franges du champ principal, même à vitesse constante, à moins qu'on ne donne aux masses polaires un biais extrêmement large. Dans les machines à pôles auxiliaires, il est inutile d'abattre ainsi les angles des cornes polaires et l'on a plus de surface pour le passage du flux.

Dans l'établissement des machines électriques d'après les anciennes méthodes, un certain nombre de dimensions étaient limitées par la crainte de crachements aux balais. Par exemple, on ne pouvait placer plus d'un certain nombre d'ampère-tours par centimètre de périphérie de l'induit, de peur d'une trop forte réaction d'induit. De même, on ne pouvait pas adopter une trop faible valeur pour l'entrefer. L'emploi de pôles auxiliaires conduit à des modifications radicales dans les proportions des machines, qui réduisent les dimensions de celles-ci.

La modification dans la quantité relative de fer et de cuivre sur l'induit entraîne une modification importante de la courbe de rendement. Le volume de fer étant diminué, les pertes par hystérésis et courants de Foucault sont diminuées. L'augmentation de cuivre augmente les pertes Joule RI^2. Le rendement à pleine charge est pratiquement le même que dans un moteur ordinaire, mais aux faibles charges, le rendement est meilleur. Le rendement moyen, sous charge variable, est meilleur.

R. R.

***Alternateurs asynchrones.* — G. Faccioli. —** *Electrical World*, 14 juillet 1906.

Dans une étude présentée à l'American Institute, Stanley a donné une description d'alternateurs excités par des courants alternatifs à basse fréquence et a expliqué les caractéristiques de ces machines quand la fréquence engendrée est la somme ou la différence des fréquences d'excitation ou de rotation. Par suite du fait que les conducteurs de l'enroulement inducteur se déplacent avec une vitesse différente de la vitesse de rotation électromagnétique du flux dans l'entrefer de la machine, tout courant de charge passant dans l'induit de l'alternateur est exactement reproduit dans son circuit inducteur. Ces courants dans le circuit inducteur sont appelés « courants semblables » parce qu'ils sont, en réalité, l'image réfléchie des courants correspondant à la charge sur laquelle travaille le circuit induit. De tels courants sont la caractéristique des alternateurs asynchrones.

La machine décrite par l'auteur diffère par deux points particuliers de celles précédemment étudiées. En premier lieu, sa caractéristique est indépendante de la position des conducteurs ; en second lieu l'excitatrice est de dimensions normales, car elle n'est pas parcourue par les courants

semblables de l'alternateur. Dans la dernière forme de ce type de machine, l'alternateur est excité par des courants de basse fréquence dont la réaction d'induit est compensée par les courants semblables circulant dans la machine.

Dans toutes les machines de ce type construites jusqu'à présent, l'importance de l'excitatrice était proportionnelle à la capacité de l'alternateur multiplié par le rapport de la fréquence d'excitation et de la fréquence engendrée, parce que l'excitatrice était parcourue par des courants semblables proportionnels aux courants produits. Pour qu'une telle machine pût être commerciale, il était nécessaire de réduire la fréquence d'excitation à la valeur la plus basse possible, et, dans l'étude de Stanley, les relations entre la fréquence d'excitation et les caractéristiques de l'alternateur, ainsi que les limites auxquelles on peut réduire une telle fréquence, étaient examinées en détail. Des expériences soigneuses ont montré qu'une fréquence d'excitation de 2 à 5 périodes par seconde convient parfaitement.

L'auteur passe rapidement en revue le fonctionnement de ces machines dans différentes conditions d'excitation. Quand la fréquence engendrée par l'aternateur est égale à la différence de la fréquence de rotation et de la fréquence d'excitation, l'aimantation de la machine est plus élevée en charge non inductive qu'à vide, résultat dû principalement à la résistance ohmique du circuit d'excitation de l'alternateur qui empêche les courants semblables de neutraliser entièrement la force magnétomotrice du courant de l'induit. La résultante de la force magnétomotrice de la charge et les courants semblables augmentent l'aimantation à vide de la machine en charge non inductive, mais tendent à diminuer l'aimantation primitive en charge inductive. Le résultat est que la différence de potentiel aux bornes de l'alternateur augmente en charge non inductive et diminue en charge fortement inductive.

Quand la fréquence produite est égale à la somme de la fréquence d'excitation et de la fréquence de rotation, la résistance du circuit inducteur a une réaction positive ; elle tend à diminuer l'aimantation et, par suite, la différence de potentiel aux bornes en charge inductive ou non inductive.

Il est évident que si ces deux effets sont combinés et opposés l'un à l'autre, la machine peut être établie pour produire une différence de potentiel constante à charge non inductive. Ce résultat est obtenu par Stanley au moyen d'un alternateur double muni d'une excitatrice à collecteur portant trois balais décalés de 120°. Cet alternateur double consiste en deux machines clavetées sur le même arbre et comprenant chacune un rotor et un stator. Les deux stators sont du type normal et portent des enroulements induits polyphasés. Les deux rotors sont semblables à des rotors de moteurs d'induction et sont aussi munis d'enroulements polyphasés. L'excitatrice produit les courants d'excitation à basse fréquence. Les rotors sont excités en parallèle par ces courants, mais les connexions sont telles que, tandis que le flux magnétique dans l'un des alternateurs tourne dans le même sens que le rotor, le flux de l'autre alternateur tourne dans la direction opposée. Il en résulte que la fréquence des courants engendrés dans le premier induit est égale à la somme des fréquences d'excitation et de rotation, tandis que la fréquence des courants engendrés dans le second induit est égale à la différence des fréquences d'excitation et de rotation. Les deux induits sont en série : il est donc nécessaire que les fréquences engendrées soient identiques. Ce résultat est obtenu en enroulant les deux alternateurs pour des nombres de pôles différents.

Si, par exemple, la fréquence d'excitation est de 5 périodes par seconde et la vitesse mécanique du rotor de 600 tours par minute, l'alternateur excité par le flux tournant en avant peut être établi pour 10 pôles, et l'alternateur excité par le flux tournant en arrière peut être établi pour 12 pôles. Dans ce cas la fréquence de rotation de la première machine est de 50 périodes, et la fréquence engendrée de 55 périodes : la fréquence de rotation du second alternateur est de 60 périodes, et la fréquence engendrée est de 55 périodes.

Si la vitesse des alternateurs est modifiée, la fréquence d'excitation restant constante, les fréquences engendrées ne sont plus égales. D'autre part, si la fréquence d'excitation varie proportionnellement à la vitesse des alternateurs, les fréquences engendrées continuent à être identiques. Si par exemple, dans le cas dont il s'agit, la vitesse tombe de 600 à 300 tours par minute et qu'en même temps, la fréquence d'excitation tombe de 5 à 2,5 périodes par seconde, la machine excitée par le flux tournant en avant produit une fréquence de $25 + 2,5 = 27,5$ cycles, et la machine excitée par le flux tournant en arrière

produit une fréquence de 30 — 2,5 = 27,5 périodes. La fréquence de l'excitatrice étant proportionnelle à sa vitesse, il est évident qu'il suffit de maintenir cette vitesse proportionnelle à celle des alternateurs.

Il est évident que chacune des deux machines ne fournit que la moitié de la charge totale du système. La figure 1 représente le diagramme

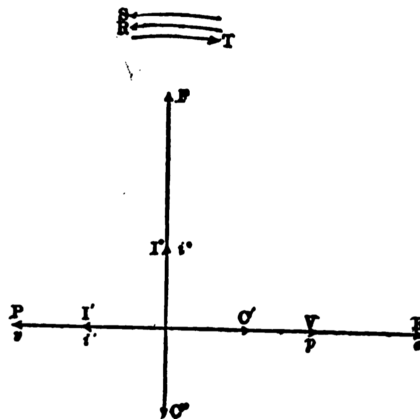


Fig. 1.

des vecteurs, si l'on néglige les effets dus à la dispersion et à la résistance. F est le flux total des machines, supposé le même dans les deux alternateurs : il tourne à une vitesse correspondant à 55 périodes dans les entrefers des deux alternateurs : il induit la force électromotrice E dans l'induit de la machine hypersynchrone et la force électromotrice *e* dans l'induit de l'autre machine. Ces f. é. m. E et *e* sont en phase et sont décalées de 90° en arrière du flux. La flèche S représente le sens de rotation des vecteurs du diagramme.

Le flux F tourne à la vitesse de 5 périodes par seconde par rapport aux conducteurs des deux rotors et coupe ceux-ci en sens opposé. En ce qui concerne les rotors, le diagramme tourne donc dans la direction R pour la machine hypersynchrone, et dans la direction T pour l'autre machine. Le flux F induit dans le rotor de la machine hypersynchrone une f. é. m. V, et dans le rotor de l'autre machine une f. é. m. opposée en phase à V. Le potentiel de l'excitatrice est alors P pour la machine hypersynchrone et *p* pour l'autre.

Si l'on suppose que le stator est traversé par le courant C′ en phase avec la différence de potentiel aux bornes de système, les courants semblables dans les deux machines sont représentés par I et *i*, et sont en phase avec C′ et opposés à C′. Si le système est chargé par un courant déwatté C°, les courants semblables sont I° et *i*°.

Le résultat est que, dans l'alternateur entraîné à une vitesse supérieure au synchronisme, le courant I′ est en phase avec la différence de potentiel aux bornes de l'excitatrice, c'est-à-dire que, pour une charge non inductive, l'excitatrice fournit de l'énergie. Dans l'alternateur entraîné à une vitesse inférieure au synchronisme, le courant semblable *i* est opposé en phase à la différence de potentiel aux bornes de l'excitatrice et l'alternateur fournit de l'énergie à l'excitatrice. D'autre part, quand le système supporte une charge déwattée, les deux courants semblables I° et *i*° sont décalés de 90° en arrière de la différence de potentiel aux bornes de l'excitatrice et ont la même phase que les courants d'excitation.

Quand la charge est non inductive, les courants semblables circulent à l'intérieur des deux rotors sans passer dans l'excitatrice : celle-ci peut donc avoir des faibles dimensions. Quand la charge est inductive, les composantes déwattées des courants semblables des deux machines passent dans l'excitatrice. En conclusion, quand le système supporte une charge non inductive, l'excitatrice fournit aux bobines inductrices de l'alternateur seulement les courants magnétisants primitifs à vide et, par suite, le voltage d'excitation est constant.

Dans ces conditions, la machine entraînée à une vitesse supérieure au synchronisme tend à présenter une chute de potentiel en charge non inductive, tandis que l'autre machine tend à présenter une élévation de potentiel. Si les deux machines sont établies de telle façon que les deux variations de potentiel soient complémentaires, la différence de potentiel aux bornes du système total est constante, ou bien peut présenter une élévation progressive.

Le réglage est obtenu par un effet différentiel, et la variation de tension de chacune des machines individuelles peut avoir une valeur élevée, ce qui permet d'établir économiquement les deux alternateurs ou de réduire la fréquence d'excitation pour diminuer les dimensions de l'excitatrice. Dans le cas d'une charge fortement inductive, les deux machines présentent une chute de potentiel. Mais le réglage dépendant beaucoup, dans ce cas, de l'induction mutuelle entre le stator et le rotor, la chute de tension peut être limitée par un dimensionnement judicieux des machines. En outre,

l'excitatrice employée dans ce système présente une élévation de tension quand elle fournit des courants décalés en arrière. La compensation entre le réglage des alternateurs et celui de l'excitatrice est automatique, mais les phénomènes en jeu dans les excitatrices à basse fréquence sont si complexes que l'auteur en réserve la discussion détaillée pour une étude spéciale.

R. R.

Sur l'accouplement élastique des masses tournantes et son influence sur le réglage du moteur. — **P. Ehrlich.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 12 juillet 1906.

La théorie des oscillations du régulateur d'une machine motrice a été développée par plusieurs physiciens, mais on n'a tenu compte, jusqu'à présent, que de l'action des masses du régulateur et non de l'élasticité des organes (arbres, accouplement, leviers, tiges) interposés entre la machine motrice et la machine entraînée. Un régulateur n'est stable que quand ses oscillations produites par une variation brusque de charge sont rapidement amorties, ainsi que les variations de vitesse qui en résultent. Les deux oscillations dues à l'action des masses et à l'élasticité des organes interposés doivent être étudiées au point de vue de leur action commune.

Le système composé de la machine motrice et de la machine entraînée tourne avec une vitesse angulaire uniforme quand la puissance fournie L_f est égale à la puissance restituée L_r. Si L_f croît tout à coup, le système prend une accélération angulaire finie. L'ensemble des organes intermédiaires élastiques subit une torsion nouvelle et transmet une puissance mécanique L_u oscillante, tantôt positive, tantôt négative. Dans un tel système, la puissance fournie L_f, la puissance transmise L_u et la puissance restituée L_r ne concordent pas. Si, par exemple, la puissance fournie et la puissance restituée sont égales entre elles, et si la puissance transmise est plus faible qu'elles deux, la machine motrice produit plus de travail qu'elle n'en fournit et s'accélère ; la machine entraînée ralentit au contraire parce qu'elle reçoit moins de travail qu'elle n'en restitue. La torsion relative des deux systèmes tournants croît ; le mouvement relatif de la machine motrice et de la machine entraînée est oscillant. L'amplitude des oscillations peut, dans le cas de la résonance, atteindre des valeurs très élevées, quand la période d'oscillation propre élastique concorde avec un des termes harmoniques de la puissance fournie, cas qui a amené des ruptures dans les machines marines à arbre de grande longueur.

Il faut d'abord déterminer en elle la période propre d'oscillation de l'organe élastique interposé et du régulateur. Soit c le couple qui tord l'accouplement d'un arc ayant la longueur du rayon, J_1 le moment d'inertie des masses du moteur, J_2 celui de la machine entraînée (générateur électrique) : la durée d'une petite oscillation propre de l'organe élastique interposé est

$$\tau = \frac{2\pi}{\sqrt{c\frac{J_1+J_2}{J_1J_2}}}.$$

Soit m la masse du régulateur rapportée à la douille, c_1 la force qui déplace celle-ci d'une longueur de un centimètre par rapport à sa position d'équilibre instantanée : la durée d'une petite oscillation de la douille du régulateur par rapport à la position d'équilibre est

$$\tau_r = 2\pi\sqrt{m/c_1}.$$

On étudie alors la réaction du système à accouplement élastique sur le régulateur d'après la méthode des petites oscillations pour un régulateur muni d'un frein à huile. On obtient, en principe, les résultats suivants dans la comparaison des conditions de stabilité des trois cas :

A : accouplement rigide du régulateur avec le moteur,

B : accouplement rigide du régulateur de la machine entraînée (générateur électrique),

A et B : accouplement élastique du régulateur avec le moteur et avec la machine entraînée,

C : accouplement rigide des deux machines.

Cas A : La commande du régulateur par le moteur n'est possible avec l'emploi d'un organe intermédiaire élastique que quand l'on a $\tau > \tau_r$, c'est-à-dire quand l'organe intermédiaire est suffisamment souple. Le moment d'inertie J_2 du générateur électrique n'agit pas pour le réglage : il est au contraire nuisible.

Cas B : La commande du régulateur par le générateur n'est possible que quand on a $\tau < \tau_r$, c'est-à-dire quand l'organe intermédiaire est suffisamment rigide.

Le moment d'inertie J_1 du moteur doit être faible.

Les deux cas A et B avec accouplement élastique sont plus défavorables, au point de vue du réglage stable, que le cas C avec accouplement rigide, de sorte que le couple d'inertie total $J_1 + J_2$ doit être plus fort pour assurer un réglage équivalent. En tous cas, quand les masses tournantes sont reliées par un accouplement élastique, il peut se produire des oscillations que le régulateur est impuissant à diminuer, quel que soit son amortissement. Il faut introduire un amortissement dans l'organe élastique interposé, en réunissant un accouplement élastique et un accouplement par friction, comme cela est réalisé dans les accouplements à courroie de cuir de Zodel-Voith. La commande du régulateur doit être aussi voisine que possible de la plus grande masse d'inertie.

La conclusion de l'auteur indique brièvement quelques exemples des deux cas, où une valeur calculée de la durée d'oscillation τ_r est égale à 0,35 seconde vis-à-vis de la valeur $\tau = 0{,}05$ seconde dans le cas B.

Le résultat principal de cette étude est que, par suite de l'élasticité de l'organe intermédiaire dans le cas A de la commande du régulateur par le moteur, l'inertie du générateur électrique est inutile, et même nuisible, pour la stabilité du réglage.

B. L.

TRACTION

Sur le poids adhérent des locomotives monophasées. — **Ossanna.** — *Annalen der Elektrotechnik*, juillet 1906.

On sait que les locomotives à courant continu et à courants triphasés peuvent exercer des efforts de traction plus considérables que les locomotives à vapeur pour un même poids adhérent, parce que leur couple est constant tandis que, dans les machines à vapeur, le couple maximum dépasse de 15 à 20 % le couple moyen. Cet avantage des locomotives électriques vis-à-vis des locomotives à vapeur ne semblait plus exister pour les locomotives monophasées, car les moteurs monophasés à collecteur possèdent un couple encore plus variable que celui des machines à vapeur.

L'auteur montre que, cependant, la locomotive monophasée est à peine inférieure à ce point de vue à la locomotive triphasée ou continue. Pour cela il calcule le glissement et les pertes dues au glissement. Soient α, $d\alpha/dt$ et $d^2\alpha/dt^2$ le chemin angulaire de glissement, la vitesse angulaire de glissement et l'accélération angulaire de glissement : soit Θ le moment d'inertie réduit à l'arbre du moteur. Dès que le couple du moteur M_t dépasse le couple de frottement M_R réduit à l'arbre du moteur, les roues commencent à glisser sur les rails, glissement dont l'accélération est donnée par l'équation

$$\Theta\,(d^2\alpha/dt^2) = M_t - M_R.$$

Si l'on met cette équation sous la forme

$$\Theta d\,(d\alpha/dt) = (M_t - M_R)$$

et si on l'intègre, on obtient l'équation :

$$\Theta \frac{d\alpha}{dt} = \int_{t_1}^{t} (M_t - M_R)\, dt.$$

L'expression placée sous le signe d'intégration n'est autre que la surface de la courbe du couple $M_t - M_R$ sur la longueur $(t - t_1)$. Au temps $t = t_1$ la différence $t - t_1$ est nulle, ainsi que la surface et la vitesse angulaire. Au temps $t = t_2$, la surface sur la longueur

$$(t - t_1) = (t_2 - t_1)$$

est maxima (fig. 1) et, avec elle, la vitesse angulaire.

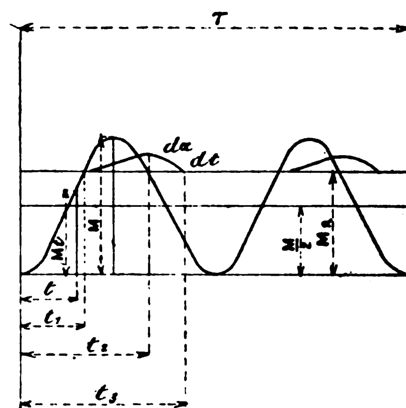


Fig. 1.

Au delà du temps t_2, les ordonnées $(M_t - M_R)$ deviennent négatives ; à la surface positive s'ajoute une surface négative, et la vitesse angulaire du glissement diminue. Au temps t_3, la surface négative ajoutée est aussi grande que la surface positive sur la longueur $(t_2 - t_1)$: le glissement cesse et, avec lui, l'application de l'équation établie. Si le couple de frottement est égal au couple moteur, on voit, en traçant la courbe,

que le glissement commence au temps $t_1 = T/8$: au temps $t_2 = 3T/8$, la vitesse de glissement est maxima ; au temps $t_3 = 5T/8$, elle est nulle.

L'auteur suppose que le couple du moteur à collecteur suit la loi simple suivante :

$$M_t = M \sin^2\left(\frac{2\pi t}{T}\right),$$

M_t étant la valeur instantanée et M la valeur maxima. Il établit, en partant de cette hypothèse et de ce qui précède, des formules pour la vitesse de rotation maxima, le chemin de glissement x, les pertes par glissement et le rapport entre les pertes par glissement et la puissance du moteur.

En conclusion, l'auteur poursuit un calcul numérique en prenant comme exemple la locomotive Siemens-Schuckert à 20000 volts des chemins de fer suédois et trouve que, dans ce cas, la vitesse maxima de glissement est de 8 millimètres par seconde environ et que les pertes de glissement ne représentent pas 1 °/₀₀ de la puissance du moteur. Ces conclusions s'appliquent au cas où il n'y a pas d'intermédiaire élastique interposé entre le moteur et les roues.

O. A.

Chemin de fer électrique à contacts superficiels système Krizik. — **Schwerak.** — *Elektrische Bahnen*, 4 août 1906.

Un chemin de fer électrique à plots de contact a été établi à Prague et traverse le fleuve sur le pont appelé Karlsbrücke. Des dispositions particulières ont dû être adoptées à cause de la faible hauteur disponible entre le tablier du pont et la chaussée. Entre les rails de chaque voie sont placés, tous les 2m,50, deux plots de contact symétriques par rapport à l'axe de la voie et distants de 50 centimètres. L'un des plots de contact sert au passage du courant principal de traction; l'autre sert de contact auxiliaire pour le courant de batterie ou courant auxiliaire.

Sous la voiture sont disposés deux frotteurs longitudinaux de 3m,60 de longueur. Une petite batterie d'accumulateurs de 4 éléments envoie, par le contact auxiliaire, un courant dans un relais auxiliaire correspondant disposé dans un coffre en tôle placé dans le parapet du pont: de là le courant traverse l'enroulement du relais principal et retourne à la batterie par les rails. Les armatures du relais auxiliaire et du relais principal sont attirées et ferment le circuit du courant principal amené aux coffres de relais par un câble et retournant par les rails de roulement. Pendant la marche de la voiture, ce courant charge la batterie d'accumulateurs.

Les plots de contact sont formés d'une tête amovible et remplaçable vissée dans une enveloppe métallique : une masse isolante d'asphalte fixe celle-ci dans un pot inférieur en fonte : le niveau supérieur du plot ne dépasse que de 3 centimètres celui de la chaussée.

O. A.

Locomotive à accumulateurs.

Lors de la construction du chemin de fer souterrain du Great Northern Piccadilly and Brompton (Londres), on a employé, pour l'enlèvement des terres et des déblais dans le tunnel, une locomotive spéciale à accumulateurs. Celle-ci mesure 15m,50 de longueur et 2m,45 de largeur : elle est formée d'un long truck fermé contenant une batterie de 80 éléments de 1450 ampère-heures : à chaque extrémité de ce truck est disposée une cabine de mécanicien fortement surbaissée, de façon que la hauteur maxima totale ne dépasse pas 2m,90. Le poids de la machine s'élève à 65 tonnes, dont 32 tonnes pour la batterie d'accumulateurs. Celle-ci est du type Chloride. Deux moteurs, qui attaquent chacun l'un des deux bogies sur lequel repose le truck, assurent à la machine une vitesse de 15 kilomètres à l'heure.

R. R.

Suspension caténaire des lignes de trôlet.

L'établissement des lignes de travail à haute tension, telles que celles employées dans les installations de traction monophasée, doit répondre à des conditions de solidité, d'isolement et de sécurité tout à fait particulières. Des essais ont été faits à ce sujet en Amérique sur des lignes nouvellement installées entre Utica et Syracuse avec un matériel particulier.

La ligne est supportée par des poteaux tubulaires en acier de 15 mètres de longueur formés de trois pièces : le diamètre est de 25 centimètres à la partie inférieure, de 22cm,5 au milieu et de 20 centimètres au sommet. Chaque poteau pèse environ 1 200 kilogrammes. Le câble de suspension est soutenu sur un bras en potence et placé sur un isolateur du type à haute tension

à triple cloche essayé à 80 000 volts. Directement sous cet isolateur, et enfilé sur le bras en potence, est placé un isolateur du type accordéon consistant en deux porcelaines munies de gorges qui recevraient le câble de suspension au cas où l'isolateur supérieur viendrait à se rompre. Une nouveauté consiste aussi dans l'incorporation de fils de cuivre dans le câble de suspension en acier, qui contribue ainsi pour une large part à conduire le courant et sert de feeder. Le câble est composé de fils en acier Siemens et a $1^{cm},5$ de diamètre : il est recouvert d'une triple couche d'isolant imperméable. Il supporte un fil de trôlet de $11^{mm},7$ de diamètre (107 millimètres carrés) muni d'une gorge de suspension et soutenu par de petites pièces rigides en acier fixées d'une part à un collier serré sur le câble de suspension, et portant d'autre part la pièce d'attache du fil avec lèvres de serrage.

Dans plusieurs expériences, on effectua des essais de traction sur le poteau et sur l'isolateur à haute tension, sur le câble de suspension, sur le fil de trôlet, et sur les bras en console des poteaux. Tous ces essais ont montré qu'avec ce mode de construction on peut compter sur une sécurité absolue.

R. R.

Appareil pour la vérification de l'isolement des lignes de trôlet.

Un nouvel appareil, construit par Everett Edgcumbe, permet d'effectuer, avec une grande facilité et rapidité, la vérification de l'isolement d'une ligne de traction. Il consiste en une barre transversale s'adaptant sur la perche de trôlet au-dessous de la roulette : cette barre porte deux archets isolés placés latéralement de part et d'autre de la roulette et parallèles à l'axe de la voie. La roulette frotte sur le fil de travail ; les deux archets frottent, au moment de leur passage, sur les fils transversaux qui supportent les isolateurs soutenant le fil.

Un galvanomètre intercalé entre les archets et le trôlet montre immédiatement si l'isolement est bon ou défectueux. La vitesse à laquelle la voiture marche pendant ces essais est de 11 à 12 kilomètres à l'heure : on voit donc que la vérification d'une voie peut être faite très rapidement.

R. R.

OSCILLATIONS HERTZIENNES & TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

Sur la résonance avec des condensateurs imparfaits. — **G. Benischke.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 26 juillet 1906.

D'après la théorie, la résonance a lieu, dans un circuit de résistance w, de self-induction L et de capacité C en série, quand ce circuit est parcouru par un courant alternatif de pulsation ω telle que $\omega^2 CL = 1$, ou, en d'autres mots, quand la résistance inductive ωL est égale à la résistance de capacité $(1/\omega C)$. Dans ce cas, l'intensité est donnée par la formule $J = K/w$ en appelant K la différence de potentiel agissant aux bornes. Si l'on fait une expérience dans ces conditions, on constate que la valeur maxima du courant est généralement très inférieure à la valeur théorique. Cela provient de ce que les condensateurs sont presque toujours imparfaits et présentent un faible courant de conduction. L'imperfection des condensateurs à ce point de vue provient de trois causes.

1° Les isolants employés comme diélectriques n'ont pas une résistance spécifique infiniment grande. Comme ils sont utilisés sous forme de feuilles de faible épaisseur et de grande surface, le courant de conduction est important et produit de la chaleur par effet Joule. Il y a lieu de noter que la résistance du diélectrique sous une tension élevée n'est pas la même que la résistance mesurée sous faible tension. Elle est généralement beaucoup plus faible.

2° Tous les isolants, excepté les isolants gazeux, la paraffine pure et homogène, et le mica pur et incolore, présentent des charges résiduelles. Sous l'effet d'une tension alternative, la charge résiduelle d'une demi-période se compose avec la charge de la demi-période suivante et il en résulte une perte, avec formation de chaleur. On désigne souvent ce phénomène sous le nom d'hystérésis diélectrique.

3° Les plaques ou armatures de condensateurs employées sont soumises aux attractions et aux répulsions : c'est de là que provient le bruit produit par les condensateurs en fonctionnement. Le travail mécanique correspondant représente une perte d'énergie électrique. Toutes ces pertes croissent comme le carré de la tension agissante.

Pour étudier les pertes dans un condensateur,

il faut se représenter celui-ci comme shunté par une résistance ω_n non inductive, qui correspond à toutes les pertes existantes. La tension agissante n'est pas la différence de potentiel aux bornes du système total, mais la différence de potentiel aux bornes du condensateur, qui peut être beaucoup plus élevée que la précédente dans le cas de résonance.

Soient $K = 100$ volts ; $w = 10$ ohms ; $C = 10^{-6}$ farad ; $\nu = 48$; $\omega = 2\pi\nu = 300$. La résonance a lieu pour $L = 11,1$ henrys, l'intensité du courant est $J = K/w = 10$ ampères. La différence de potentiel aux bornes du condensateur E_c est $E_c = J/\omega C = 33\,300$ volts. C'est cette différence de potentiel qui existerait si le condensateur était parfait.

D'une façon générale, si l'on a un circuit contenant deux branches en parallèle, et si l'on appelle w et L la résistance et la self-induction du circuit, non compris les deux branches, w_1 et L_1, w_2 et L_2 les résistances et la self-induction de chacune de ces branches, on a, en désignant par W_s la résistance apparente totale du système et par K la différence de potentiel à ses bornes, l'équation :

$$J = \frac{K}{W_s} = \frac{K}{\sqrt{(w+R)^2 + \omega^2(L+N)^2}}; \qquad (1)$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\omega(L+N)}{w+R}, \qquad (2)$$

en posant pour abréger l'écriture :

$$R = \frac{A}{A^2+\omega^2B^2}; \quad N = \frac{A}{A^2+\omega^2B^2};$$

$$A = \frac{w_1}{w_1^2+\omega^2L_1^2} + \frac{w_2}{w_2^2+\omega^2L_2^2};$$

$$B = \frac{L_1}{w_1^2+\omega^2L_1^2} + \frac{L_2}{w_2^2+\omega^2L_2^2}.$$

Dans le cas d'un circuit contenant une self-induction et un condensateur imparfait, on a :

$$w_1 = w_n; \quad L_1 = 0;$$

$$w_2 = 0; \quad L_2 = -1/\omega^2C;$$

$$A = \frac{1}{w_n}; \quad B = -C;$$

$$R = \frac{w_n}{1+(\omega w_n C)^2};$$

$$N = \frac{w_n^2 C}{1+(\omega w_n C)^2};$$

$$J = \frac{K}{\sqrt{\left[w + \frac{w_n}{1+(\omega w_n C)^2}\right]^2 + \omega^2\left[L - \frac{w_n^2C}{1+(\omega w_n C)^2}\right]^2}}; \qquad (3)$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\omega\left[L - \frac{w_n^2C}{1+(\omega w_n C)^2}\right]}{w + \frac{w_n}{1+(\omega w_n C)^2}}. \qquad (4)$$

L intervenant seulement dans le second terme de l'expression de J, on voit que le courant atteint sa valeur maxima pour

$$L = \frac{w_n^2C}{1+(\omega w_n C)^2}, \qquad (5)$$

et que le décalage est nul. Dans ce cas de résonance, on a :

$$J = \frac{K}{w + \frac{w_n}{1+(\omega w_n C)^2}}. \qquad (6)$$

tandis que, si le condensateur était parfait, on aurait $J = K/w$.

On voit donc que les pertes diélectriques ou les pertes par dérivations (aigrettes, étincelles, etc.), ont pour effet de diminuer la valeur maxima du courant et d'amener la résonance pour une valeur plus faible de L, qui dépend de la résistance w_n du condensateur, tout en étant toujours indépendante de la résistance w en série.

Si $(\omega w_n C)^2$ est assez petit pour pouvoir être négligé vis-à-vis de l'unité, la condition de résonance devient :

$$L = w_n^2 C, \qquad (7)$$

et la valeur maxima du courant est :

$$J = \frac{K}{w + w_n} \qquad (8)$$

comme si les deux résistances, sans condensateur, étaient en série.

Si au contraire $(\omega w_n C)^2$ est assez grand pour qu'on puisse négliger l'unité en comparaison, on a pour la condition de résonance :

$$L = 1/\omega^2 C \qquad (9)$$

comme si le condensateur était parfait. La valeur maxima du courant est alors la suivante :

$$J = \frac{K}{w + \frac{1}{\omega^2 w_n^2 C^2}}. \qquad (10)$$

Si le produit $\omega^2 w_n C^2$, ou seulement l'un de ces

facteurs, est infiniment grand, on a $J = K/w$.

Donc, plus est grande la fréquence ou la résistance du condensateur, ou la capacité, ou plus est grand le produit de ces grandeurs, et plus la résonance se rapproche des conditions réalisées avec un condensateur parfait.

Deux exemples donnent une idée de l'influence de la résistance w_n pour une fréquence élevée ou basse.

Soit $w_n = 100\,000 = 10^5$ ohms. On a :

$$L = \frac{10^{10} \cdot 10^{-6}}{1 + (300 \cdot 10^5 \cdot 10^{-6})^2} = \frac{10000}{901} = 11{,}09 \text{ henrys}$$

$$J = \frac{100}{10 + \frac{10^5}{901}} = \frac{100}{121} = 0{,}83 \text{ ampères.}$$

Au contraire, avec un condensateur parfait, on aurait :

$$L = 11{,}11 \quad \text{et} \quad J = 10.$$

On voit combien est grande la diminution du courant produite par l'imperfection du condensateur, tandis que la valeur de la self-induction varie peu. Pour $w_n = 10^8$, la diminution du courant maximum est de 1 °/₀.

Aux fréquences élevées, l'imperfection du condensateur exerce une action importante, même quand la résistance de celui-ci est très grande. Ainsi, si l'on suppose $K = 100$; $w = 10$; $w = 10^5$; $w_n = 10^7$; $C = 10^{-9}$, on a :

$$J = \frac{100}{10 + \frac{10^7}{1 + (10^5 \cdot 10^7 \cdot 10^{-9})^2}} = 5 \text{ ampères.}$$

Avec un condensateur parfait on aurait :

$$J = 100/10 = 10 \text{ ampères.}$$

Pour $w_n = 10^{10}$, la diminution du courant maximum atteint encore 1 °/₀. Si, pour des valeurs de ω, w_n et L données, la capacité C est variable, on ne peut plus trouver directement au moyen de l'équation 3 la condition de résonance ; il faut prendre la différentielle de J en C et l'annuler. De même, il faut prendre la différentielle de J en ω quand w_n, L et C sont fixes et ω variable. La tension maxima agissant sur le condensateur est proportionnelle au courant maxima : on voit donc de combien elle est réduite par l'imperfection du condensateur. R. V.

***Sur les détecteurs d'ondes électriques à gaz ionisés.* — C. Tissot.** — *Société de Physique*, juillet 1906.

La mesure de la f. é. m. efficace opérée au sommet d'une antenne réceptrice attaquée à distance par une antenne accordée donne les valeurs de 4 à 5 volts à 1 kilomètre. Le calcul fait en partant des valeurs expérimentales pour les périodes et les amortissements indique que les amplitudes correspondantes doivent atteindre 600 à 800 volts. On peut mettre ces amplitudes en évidence par des moyens relativement grossiers : un tube de Geissler peut aisément être rendu luminescent quand on le dispose au sommet d'une antenne réceptrice.

La luminescence s'obtient de même quand on intercale le tube à vide à la place habituelle du cohéreur. La sensibilité du dispositif peut être notablement accrue si l'on crée dans le tube un champ auxiliaire en portant, à l'aide d'une batterie de petits éléments d'accumulateurs, les électrodes à une différence de potentiel très voisine de la différence de potentiel critique de décharge.

On réussit à utiliser le phénomène à des mesures quantitatives en substituant à l'observation de la luminescence celle de la conductibilité du gaz traversé par la décharge oscillante. A cet effet, on munit le tube à vide de deux électrodes latérales auxiliaires de large surface que l'on intercale dans le circuit d'une f. é. m. continue et d'un galvanomètre.

Le courant auxiliaire qui passe quand le gaz est ionisé par la décharge est une fonction complexe de la différence de potentiel entre les électrodes principales : il va en croissant dans le même sens que l'amplitude, et est susceptible de fournir des valeurs comparables tant que les décharges conservent des formes peu différentes, ainsi que cela a lieu en général dans les applications de la télégraphie sans fil.

L'effet du dispositif n'est pas tout à fait le même selon que l'on s'en sert sans champ auxiliaire, ou avec champ sensibilisateur. Dans le premier cas, il se comporte comme un autodécohéreur, tandis qu'on peut l'amener, dans le deuxième cas, à agir comme une véritable soupape.

ÉCLAIRAGE

***Sur le noircissement des lampes à incandescence et son emploi pour la détermination de la durée d'utilisation.* — Cl. H. Sharp.** — *Electrical World*, 7 juillet 1906.

Dans toutes les compagnies de distribution

qui se chargent du renouvellement des lampes, il est indispensable de pouvoir reconnaître approximativement la durée de service des lampes et leur état actuel, et de les classer ensuite en différentes catégories, au nombre de trois, par exemple ; celles qui peuvent encore assurer en service normal dans des conditions normales ; celles dont l'intensité lumineuse a décrû sensiblement, mais qui sont encore propres à certains services pour lesquels la valeur de l'intensité lumineuse n'a pas une importance primordiale (lampes colorées par exemple) ; et enfin celles qui sont bien près de leur limite de fonctionnement et qu'il n'est plus avantageux d'employer.

La façon habituelle dont on procède pour effectuer cette classification des lampes usagées repose sur une mesure photométrique au moyen de laquelle on détermine, par comparaison avec une lampe étalon, l'intensité lumineuse que produit encore la lampe et l'énergie électrique qu'elle absorbe.

Une nouvelle méthode est décrite par l'auteur : elle repose sur le noircissement des ampoules des lampes. Pendant une année, trois cents lampes environ ont été étudiées jusqu'à rupture du filament. Les durées totales de fonctionnement présentées par ces lampes ont été comprises entre 50 et 2 868 heures. On a constaté que le noircissement de l'ampoule est proportionnel à la durée de service de la lampe. On a pu établir alors une échelle arbitraire de noircissement de l'ampoule et, pour déterminer la durée de service d'une lampe, on compare son noircissement avec les différents degrés de noircissement de l'échelle. Pour faciliter cette comparaison, on a placé l'échelle de lampes devant un écran en verre uniformément éclairé. Des intervalles sont ménagés entre les différentes lampes constituant l'échelle, et l'on vient placer dans la lampe étudiée jusqu'à ce que l'on trouve la place qu'elle occupe dans la série.

Les résultats obtenus sur le noircissement des lampes en fonction de la durée d'utilisation, ont été portés sous forme de courbes. Ces courbes sont des droites et coupent l'axe des temps au point pour lequel la lampe, après avoir produit une intensité lumineuse supérieure à son intensité lumineuse primitive, revient à cette intensité lumineuse primitive. Le noircissement n'est pas perceptible jusque-là.

Pour vérifier la valeur pratique de cette méthode, on a fait de nombreuses expériences en photométrant les lampes et en les étudiant avec l'échelle de noircissement. Des expériences particulières ont été faites pour déterminer le degré de noircissement correspondant à la diminution de 20 % dans l'intensité lumineuse, c'est-à-dire le noircissement à la fin de la durée pratique de fonctionnement. Toutes les courbes obtenues sont concordantes, et montrent que le degré de noircissement constitue un criterium tout à fait commode pour évaluer la dépréciation de la lampe, criterium indépendant de la puissance lumineuse de celle-ci, tandis que l'essai au photomètre exige la connaissance des constantes initiales : il est aussi indépendant du degré de survoltage de la lampe.

Des expériences pratiques furent faites dans deux compagnies. L'une d'elles classait ses lampes en trois groupes au moyen du photomètre : les lampes donnant plus de 15 bougies ; celles donnant entre 14 et 15 bougies, et celles donnant moins de 14 bougies. On prépara des étalons de noircissement de l'ampoule correspondant à ces différents échelons dans la vie des lampes, puis on classa les lampes au moyen du nouveau procédé et l'on fit une vérification au photomère.

Les résultats ont été les suivants :

TABLEAU 1

Classification d'après le noircissement.

	1er JOUR	2e JOUR
Nombre de lampes de 16 bougies examinées.	368	432
Nombre de lampes classées dans le groupe n° 1 (plus de 15 bougies)	180	242
Nombre de lampes classées dans le groupe n° 2 (de 14 à 15 bougies)	100	100
Nombre de lampes classées dans le groupe n° 3 (au-dessous de 14 bougies)	88	80

Classifications fausses d'après l'essai photométrique.

	1er JOUR	2e JOUR
Groupe n° 1.	8 lampes, soit 4,5 %	24 lampes ou 10 %
Groupe n° 2.	29 — 29	31 — 31
Groupe n° 3.	6 — 6,8	31 — 2,5
Erreurs totales.	43 lampes, soit 12 %	57 lampes ou 13 %

Si l'on avait voulu classer les lampes en deux

groupes seulement, comprenant celles dont la puissance lumineuse est supérieure à 14 bougies et celles dont la puissance lumineuse est inférieure à ce chiffre, on aurait obtenu les résultats indiqués par le tableau II.

TABLEAU II

Classement en deux groupes.

	1er JOUR	2e JOUR
Erreurs. .	1er groupe 12,3 % 2e — 3,7 %	1er groupe 5,1 % 2e — 7,2 %

On voit que les résultats sont tout à fait satisfaisants en ce qui concerne le classement des lampes au-dessus de 15 bougies et au-dessous de 14. Les erreurs sont plus considérables pour le classement entre 13 et 15 bougies : cela correspond à la plus grande différence éprouvée pour discerner entre d'aussi faibles différences dans le noircissement de l'ampoule. Même dans ces conditions, la méthode peut encore rendre des services, puisque 70 % de ces lampes ont été correctement classées.

Le grand avantage de la méthode est la rapidité. Pour photométrer les lampes, il a fallu deux opérateurs pendant quatre heures : pour les classer d'après le noircissement, il a suffi d'un observateur pendant une heure, y compris le temps nécessaire pour nettoyer les ampoules.

L'examen de 950 lampes renvoyées à une autre compagnie a montré que, pour faire le classement en deux groupes comprenant les lampes d'intensité supérieure ou inférieure à 13 bougies, les erreurs maxima ont été de 5 %. La méthode permet de voir immédiatement si l'on a rendu les lampes trop tôt ou trop tard, ce qu'il est utile de connaître quand on remplace gratuitement les lampes. Par exemple, l'examen de 1 300 lampes renvoyées à une compagnie d'éclairage a montré que le noircissement moyen correspondait à une période moyenne d'utilisation supérieure de 20 % à la durée pratique de fonctionnement.

Des mesures ont été faites pour déterminer la quantité de lumière absorbée par le noircissement. Pour cela, on a placé, dans des ampoules dont le noircissement correspondait à celui des différentes ampoules de l'échelle, une petite lampe miniature et l'on a fait une mesure photométrique. La courbe ainsi obtenue atteint 17 % de la puissance lumineuse pour l'ampoule la plus noire.

R. R.

***Expériences sur la détermination de l'intensité lumineuse sphérique ou hémisphérique moyenne** (suite)* (1). — **B. Monasch.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 26 juillet 1906.

Pour l'étalonnage des photomètres intégrateurs, les lampes à arc semblent tout à fait impropres, même quand, avec des pointes de charbon convenables, on remplit les conditions de symétrie axiale en centrant rigoureusement les charbons verticaux. Les lampes à incandescence sont beaucoup plus appropriées. Il semble avantageux d'employer des lampes à ampoule sphérique dépolie par un jet de sable dans l'air comprimé. L'auteur, dans une mesure photométrique préliminaire, a déterminé les intensités moyennes hémisphériques et sphériques de ces lampes en traçant point par point les courbes de radiation lumineuse et a trouvé que la symétrie axiale est assurée. Le tableau I indique les résultats des mesures photométriques effectuées sur quatre lampes différentes.

TABLEAU I

LAMPE N°	DIAMÈTRE DE L'AMPOULE sphérique.	AMPÈRES	VOLTS	INTENSITÉ SPHÉRIQUE moyenne J_0.	INTENSITÉ HÉMISPHÉRIQUE moyenne inférieure J_b.	INTENSITÉ HÉMISPHÉRIQUE moyenne supérieure J_a.
	mm.			bougies.	bougies.	bougies.
I. . .	75	0,65	100	11,58	12,26	10,90
II. . .	100	0,82	100	14,50	15,0	14,00
III. . .	150	1,12	100	19,12	19,32	18,92
IV. . .	150	2,49	100	50,95	51,40	50,50

Pour la mesure de l'intensité lumineuse des sources placées dans le photomètre sphérique, on se servait d'un photomètre de Weber avec un prisme de Lummer-Brodhun. Ou bien on déterminait l'éclairement de la fenêtre en verre opale ménagée dans la surface de la sphère, en plaçant le photomètre de Weber contre elle, ou bien on plaçait le photomètre à une certaine distance de cette fenêtre dont on mesurait l'éclat. Dans le premier cas, on avait, pour l'éclairement E de la fenêtre :

$$E = \frac{C \cdot 10^4}{r^2} \text{ lux},$$

(1) *Éclairage Électrique*, tome XLVIII, 25 août 1906, p. 316.

r désignant la position sur l'échelle du photomètre en centimètres et C la constante de la fenêtre. Soit J_0 l'intensité lumineuse sphérique de la source lumineuse étudiée dans la sphère : on a $EK_B = J_0$, K_B étant la constante de la sphère. K_B a donc pour valeur J_0/E. Si, dans la seconde méthode, la distance entre la fenêtre et le photomètre est de R_{cm}, l'intensité lumineuse J_F de la fenêtre est

$$J_F = \frac{R^2 C'}{r^2} \text{ bougies},$$

en appelant C′ la constante de la glace opale dans le coffret du photomètre. On a dans ce cas

$$J_F . K_F = J_0,$$

et la constante de la sphère K_F a pour valeur J_0/J_F. Elle a une valeur différente dans la première et dans la seconde méthode parce que, dans la mesure de l'intensité lumineuse, la lumière passe par la fenêtre et l'absorption de celle-ci ne doit pas entrer par une ligne de compte dans la constante de la sphère.

La mesure de l'éclairement sur le côté intérieur de la fenêtre est recommandable quand on veut étudier des sources lumineuses relativement faibles : la mesure de l'intensité lumineuse de la fenêtre est plus avantageuse pour de fortes sources. Le choix de la méthode dépend, pour une source lumineuse donnée dans l'intérieur du photomètre sphérique, de la grandeur de la source lumineuse de comparaison dans le photomètre de Weber et des glaces opales employées. Dans les mesures effectuées, les lectures ont toujours été faites en chaque point par deux observateurs différents, et l'on a pris comme résultat la moyenne des deux lectures.

Sphère de 2 mètres de diamètre. — On a employé, pour l'étalonnage, successivement les lampes I à IV suspendues au centre de la sphère, et l'on a mesuré l'éclairement, par la lumière indirecte, d'une fenêtre d'observation arbitrairement choisie (20° au-dessus de l'horizontale). La constante C de la glace opale était 2,20. Les résultats de mesure sont indiqués dans le tableau II. La constante de la sphère avait pour valeur 0,1165. Pour sa détermination au moyen de lampes à incandescence I à IV, il y avait, dans le couvercle fermant l'ouverture supérieure de la sphère,

TABLEAU II

LAMPE N°	OBSERVATEURS	LECTURE AU PHOTOMÈTRE r en cm.	r EN MOYENNE	DIFFÉRENCE ENTRE LA VALEUR de r et la valeur moyenne en °/₀.	CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT de la lampe. Ampères.	Volts.	ÉCLAIREMENT DE LA FENÊTRE E $E = \frac{C . 10^4}{r^2}$ lux.	J_0 D'APRÈS LE TABLEAU I	CONSTANTE DE LA SPHÈRE $K_B = \frac{J_0}{E}$	ÉCART ENTRE K_B et la valeur moyenne en °/₀.
							lux.	bougies.		
	M	14,95			0,65	100				
I	P	14,85	14,90	± 0,34	0,65	100	99	11,58	0,1169	+ 0,3
	M	14,90			0,65	100				
	P	14,90			0,65	100				
	P	13,30			0,82	100				
II	M	13,25	13,30	± 0,42	0,82	100	124,5	14,50	0,1165	
	P	13,30			0,82	100				
	M	13,35			0,82	100				
	P	11,60			1,12	100				
III	M	11,55	11,57	± 0,21	1,12	100	164,5	19,12	0,1162	— 0,29
	P	11,60			1,12	100				
	M	11,55			1,12	100				
	P	7,10			2,49	100				
IV	M	7,05	7,10	± 0,71	2,49	100	437	50,95	0,1165	
	P	7,15			2,49	100				
	M	7,10			2,49	100				
							MOYENNE.		0,1165	

une ouverture circulaire de 5 centimètres de diamètre qui servait au passage des conducteurs électriques alimentant la lampe. La concordance des valeurs trouvées pour la constante K_B avec différentes lampes montre que la surface de celles-ci, dans les limites dont il s'agit, n'exerce pas d'influence sur la grandeur de la constante. Pour déterminer l'erreur qui se produit quand on choisit une autre ouverture d'observation, on laissa la lampe III au centre de la sphère et on plaça le photomètre devant une autre fenêtre le long d'un méridien. La valeur moyenne de *r* a été déterminée d'après un grand nombre de mesures faites par deux observateurs. Les plus grands écarts par rapport à la valeur moyenne de *r* sont indiqués en pour cent de la valeur moyenne. Les résultats sont donnés par le tableau III.

TABLEAU III

LAMPE N°	CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT de la lampe.		*r* EN MOYENNE	ÉCART MAXIMUM par rapport à la valeur moyenne de *r* en °/₀	CONSTANTE DE LA FENÊTRE	ÉCLAIREMENT E DE LA FENÊTRE	POSITION DE LA FENÊTRE SUR LE MÉRIDIEN	K_B	J_0 D'APRÈS LE TABLEAU I	$J_0 = E.K_B$ (calculé).	ÉCART entre LA VALEUR CALCULÉE de J_0 en °/₀ de J_0 dans le tableau I.
	Ampères.	Volts.									
					c	lux.			bougies.	bougies.	
III. . . .	1,12	100	11,6	± 0,86	2,20	163,5	5° au-dessous de l'horiz.	0,1165	19,12	19,05	— 0,37
III. . . .	1,12	100	7,59	± 0,79	0,94	163,5	51° — —	0,1165	19,12	19,05	— 0,37
III. . . .	1,12	100	15,54	± 0,39	3,99	165	25° — —	0,1165	19,12	19,22	+ 0,53
III. . . .	1,12	100	15,46	± 0,91	3,99	167	35° — —	0,1165	19,12	19,46	+ 1,8
III. . . .	1,12	100	15,83	± 2,00	3,99	160	45° — —	0,1165	19,12	18,65	— 2,5
III. . . .	1,12	100	15,55	± 0,65	3,99	165,5	55° — —	0,1165	19,12	19,30	+ 0,94

On voit, d'après les chiffres du tableau III, que le choix du point d'observation est facultatif : on peut donc faire ce choix de façon que le dispositif expérimental soit le plus commode possible.

Dans la série de mesures suivante, on détermina l'erreur produite par l'asymétrie axiale d'une lampe Nernst modèle B sans globe avec bâtonnet incandescent horizontal. Cette lampe était placée au centre de la sphère. Chaque fenêtre était éclairée une fois de façon que le plan du méridien d'observation coïncidât avec le plan passant par l'axe du bâtonnet incandescent, et une fois de façon que cet axe fût perpendiculaire au plan du méridien d'observation. Les plus grands écarts de l'intensité lumineuse sphérique, calculée d'après la valeur 0,1165 de la constante K_B et d'après l'éclairement observé ont été + 2 °/₀ et — 1 °/₀. Les erreurs étaient positives tantôt pour l'une, tantôt pour l'autre position du bâtonnet incandescent. Ces écarts sont attribuables à des erreurs de lecture et non à l'asymétrie axiale de la lampe Nernst.

Une autre série d'expériences montra que, pour différentes positions excentriques de la lampe III, depuis 10 centimètres du point le plus bas de la sphère jusqu'à 10 centimètres du point le plus haut, il n'y avait pas de différence supérieure à 1 °/₀ dans la valeur trouvée pour l'intensité lumineuse sphérique. La position excentrique de la source lumineuse ne modifie donc pas l'éclairement dans la fenêtre d'observation.

Le couvercle fermant la sphère à sa partie supérieure avait un diamètre de 50 centimètres. Quand on enlève ce couvercle dans les mesures où il n'est pas nécessaire, une partie du flux lumineux indirect sort de la sphère : l'angle au centre qui limite ce flux lumineux sortant est de 28°. Il en résulte un affaiblissement de l'éclairement des parois de la sphère et une augmentation de la valeur de la constante K_B. Quand, avec une lampe Nernst sans globe dont le bâtonnet horizontal était au centre de la sphère, on enlevait le couvercle, la valeur de la constante K_B s'élevait de 12 °/₀. Il se produit aussi une diminution de l'éclairement des parois et, par suite, une augmentation de la constante quand il y a des corps étrangers absorbant de la lumière, tels que des enveloppes et supports de lampes à arc.

Pour étudier plus complètement ces conditions, on prit une grande lampe à arc et on la plaça en différents points dans la sphère. Elle

avait des charbons verticaux et un globe ovale. La longueur totale de la lampe était de 95 centimètres. La longueur du globe était de 42 centimètres, le diamètre du plus grand cercle horizontal du globe était de $0^m,36$. Le globe était en albâtre. Comme fenêtre d'observation, on avait choisi, pour toute la série d'expériences, la fenêtre placée 5° au-dessous de l'horizontale. Comme source lumineuse étalon, on employait une lampe Nernst à bâtonnet horizontal dont l'intensité lumineuse sphérique était connue et qui était placée dans la sphère avec la lampe à arc éteinte, mais munie néanmoins de charbons. En outre, on étudia une lampe à arc intensive dont la longueur de lanterne était de 94 centimètres et dont le diamètre de globe était de 25 centimètres ; le réflecteur extérieur mentionné sur le tableau IV, expérience 15 avait un diamètre maximum de 38 centimètres. Les résultats d'expériences sont indiqués sur le tableau IV.

TABLEAU IV

EXPÉRIENCE	POSITION DE LA LAMPE DANS LA SPHÈRE	LAMPE ÉTALON NERNST B		LECTURE r en moyenne.	RAPPORT DES CONSTANTES de la sphère.		OBSERVATIONS
		amp.	volts.				
1	Lampe Nernst seule dans la sphère. — Étalonnage. . . .	0,475	110	7,80	1/1	1,000	Sphère avec couvercle.
2	Lampe à arc avec lanterne et globe entièrement dans la sphère. — 10 centimètres au-dessous du couvercle. . .	0,475	110	8,95	2/1	1,320	—
3	Lampe à arc sans lanterne, sans globe, entièrement dans la sphère. — 10 centimètres au-dessous du couvercle. . . .	0,475	110	8,20	3/1	1,110	—
4	Lampe à arc sans lanterne et sans globe. — Point lumineux 10 centimètres au-dessous du couvercle.	0,475	110	7,90	4/1	1,026	—
5	Lampe Nernst seule. — Étalonnage.	0,475	110	8,25	5/1 5/5	1,120 1,000	Sphère sans couvercle.
6	Lampe à arc avec lanterne et avec globe entièrement dans la sphère.	0,475	110	9,25	6/5	1,270	—
7	Le globe seulement et 15 centimètres de lanterne dans la sphère.	0,475	110	8,50	7/5	1,065	—
8	Cercle maximum du globe dans le cercle de la calotte. . .	0,475	110	8,30	8/5	1,013	—
9	Lampe à arc sans lanterne et sans globe. — Entièrement dans la sphère.	0,475	110	8,58	9/5	1,085	—
10	Les tiges seules de la lampe dans la sphère.	0,475	110	8,35	10/5	1,025	—
11	Lampe à arc sans lanterne et sans globe. — Point lumineux dans le cercle de la calotte.	0,475	110	8,30	11/5	1,013	—
12	Lampe à arc intensive sans globe ni lanterne. — Bord inférieur du cendrier dans le cercle de la calotte.	0,475	110	8,30	12/5	1,013	—
13	Lampe à arc intensive sans lanterne ni globe. — Bord inférieur du cendrier à 10 cm. au-dessous du cercle de la calotte. .	0,475	110	8,30	13/5	1,013	—
14	Comme précédemment : 20 centimètres au-dessous du cercle.	0,475	110	8,48	14/5	1,055	—
15	Lampe intensive avec lanterne, globe, réflecteur extérieur. Anneau supérieur du globe dans le cercle de la calotte. .	0,475	110	8,0	15/5	0,940	—
16	Lampe intensive avec lanterne et globe sans réflecteur Cercle horizontal maximum du globe dans le cercle de la calotte. .	0,475	110	8,25	16/5	1,000	—

Dans toutes les mesures auxquelles le tableau IV est relatif, la même fenêtre et le même disque de verre opale étaient employés pour une intensité lumineuse invariable de la source lumineuse de comparaison. Les valeurs de la constante de la sphère trouvées dans les différents cas sont comme les carrés des valeurs de r au photomètre.

Dans les expériences 2 et 3, la grande lampe à arc était complètement dans la sphère. Cette position pourrait être choisie pour la détermination de l'intensité lumineuse sphérique. On voit que, lorsque toute la lampe avec globe (2) est placée dans la sphère, la valeur de la constante augmente de 32 %; si on enlève le globe et la lanterne, l'augmentation de valeur de la constante est de 11 % seulement. Il est avantageux de ne pas placer toute la lampe dans la sphère, car, si l'éclairement de la fenêtre d'observa-

tion est pratiquement indépendant de la position de la source lumineuse dans la sphère, il dépend un peu de la présence des corps étrangers, tels que les armatures et les tiges. Bloch plaçait le point lumineux à 10 centimètres environ au-dessous du sommet de la sphère. L'expérience 4, faite sur une lampe sans globe, montre que l'augmentation de la constante n'a été que de 2,6 %; cette erreur reste dans les limites admissibles : il y a d'ailleurs lieu de noter que la lampe employée pour cette mesure représente à peu près le cas le plus défavorable, car elle était munie de tiges très grandes et portait des charbons de 325 millimètres de longueur et 20 millimètres de diamètre. Pour des lampes à arc avec tiges plus courtes et charbons plus minces, l'augmentation de la constante quand le point lumineux est placé à 10 centimètres au-dessous du couvercle doit être encore plus faible. Les conditions sont analogues quand on emploie la sphère sans couvercle. Si l'on doit faire des mesures de l'intensité sphérique avec la sphère sans couvercle, l'ouverture supérieure doit être dans l'ombre du point lumineux.

Dans les lampes à arc intensives, où les tiges inférieures n'existent pas, l'expérience 13 montre que l'augmentation de la constante n'est que de 1,3 % quand le point lumineux est placé à 10 centimètres au-dessous du cercle de la calotte pour une mesure de l'intensité lumineuse sphérique. Quand le point lumineux est placé à 20 centimètres au-dessous du cercle de la calotte, l'augmentation de la constante de la sphère atteint déjà 5,5 % comme le montre l'expérience 14.

On peut donc, pour les mesures de l'intensité lumineuse sphérique des lampes à arc nues, prendre une valeur commune de la constante pour différents types de lampes, à condition que le point lumineux soit placé assez haut (8 à 10 centimètres au-dessous du sommet de la sphère), car l'erreur commise sur la valeur de la constante est inférieure aux erreurs ordinairement commises dans les mesures photométriques relatives aux lampes à arc (par le tracé point par point par exemple). Pour la mesure de l'intensité lumineuse sphérique de lampes à arc avec globes, il faut déterminer à nouveau, dans chaque cas particulier, la valeur de la constante de la sphère d'une part parce que la lampe doit être placée assez bas dans la sphère quand il y a beaucoup de lumière dans l'hémisphère supérieure, et d'autre part parce que, pour les lampes à arc dont on détermine l'intensité lumineuse dans les conditions d'emploi pratique, il peut y avoir des influences agissant à l'encontre des corps étrangers absorbants. Par exemple, dans l'essai 15 dans lequel le globe de la lampe intensive était recouvert d'un réflecteur blanc émaillé, la valeur de la constante s'est abaissée de 6 %.

Pour la mesure de l'intensité lumineuse hémisphérique, dans laquelle le point lumineux des lampes à arc nues doit être placé dans le plan du cercle de la calotte, l'erreur due à la présence des tiges est si faible, comme le montrent les expériences 11 et 12, qu'une nouvelle détermination de la constante n'est pas nécessaire.

Dans la mesure de l'intensité lumineuse hémisphérique de lampes à arc munies de globes, on doit, d'après la méthode de la tache grasse indiquée par Ulbricht, déterminer le cercle horizontal du globe qu'il y a lieu de placer dans le cercle de la calotte. Les tiges étant recouvertes par le globe, il n'est pas nécessaire de déterminer à nouveau la valeur de la constante, comme le montrent les expériences 8 et 16.

Mais, dans la mesure de l'intensité hémisphérique, il faut veiller avec soin à ce que la source lumineuse soit bien placée dans le cercle de la calotte, particulièrement dans les sources lumineuses d'assez grande surface. Bloch a trouvé que, pour une lampe à incandescence, il se produisait une erreur de 12 % dans la détermination de l'intensité hémisphérique moyenne quand on plaçait la lampe à 10 millimètres de la position rigoureuse. En employant la lampe III, on a trouvé, pour un diamètre de 50 centimètres du cercle de la calotte dans une sphère de 2 mètres, une erreur de 1 % dans l'intensité lumineuse hémisphérique quand on éloignait la lampe de 1 millimètre de sa position régulière.

(A suivre.) E. B.

CHARTRES. — IMPRIMERIE DURAND, RUE FULBERT.

Le Gérant : J.-B. NOUET.

Tome XLVIII. Samedi 8 Septembre 1906. 13e Année. — N° 36.

L'Éclairage Électrique

REVUE HEBDOMADAIRE DES TRANSFORMATIONS

Electriques — Mécaniques — Thermiques

DE

L'ÉNERGIE

LONGUEUR D'ONDE ET VITESSE DE PROPAGATION DES PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES

On a vu, dans une étude précédente, l'expression de la période de vibration des ions et des électrons, et quelques conséquences diverses déduites de cette expression. Les phénomènes de luminescence provoqués par la décharge électrique à travers les gaz raréfiés ont montré notamment que la période de vibration des ions était bien plus courte que la période de vibration des radiations lumineuses, puisque c'était par suite d'un accroissement de la période de vibration que le phénomène devenait sensible d'abord à la plaque photographique (ultra-violet), et ensuite à l'œil (lavande, violet).

Nous étudierons maintenant la longueur d'onde du phénomène et sa vitesse de propagation, intimement liée à la longueur d'onde λ et à la période de vibration T, par la relation bien connue en optique :

$$\lambda = V \times T.$$

Longueur d'onde. — Par définition même, c'est la distance qui sépare deux états semblables, immédiatement voisins, de la vibration. Or ici, cette distance λ, c'est justement l'écartement des ions ε, car le phénomène vibratoire se reproduit identique à chaque ion successivement.

Application et vérification expérimentale. — Considérons le cas où, en raréfiant un gaz, on l'a amené à produire le phénomène de luminescence sous le passage du courant. La longueur d'onde du mouvement vibratoire est alors connue : c'est celle de la radiation lumineuse obtenue, le violet, par exemple.

Or, pour le violet, on a : $\lambda = 0^{mm},000\,400$ environ ou $0^{cm},000\,04$.

Cherchons alorsquel est le nombre d'ions qu'il y a dans 1 centimètre cube pour le comparer à

celui trouvé précédemment d'après la distance explosive en fonction de la tension d'autodécharge.

On a :

Nombre d'ions dans un centimètre cube $= \frac{n}{V} = \frac{n}{1^{cm^3}} = \frac{1}{\varepsilon^3} = \frac{1}{\left(\frac{4}{100\,000}\right)^3} = 15\,625\,000\,000\,000$,

soit 16 trillons environ.

On se rappelle avoir trouvé, d'après la distance explosive pour une tension d'autodécharge de 1 volt, le nombre de 125 trillions environ d'ions par centimètre cube [1].

La concordance de ces nombres, obtenus d'une manière tellement différente, est absolument remarquable, si l'on considère que, pour obtenir le phénomène de luminescence violet, il a fallu *raréfier* les ions, et les chiffres précédents montrent que cette raréfaction a été d'environ 87 %.

Vitesse de propagation du phénomène électrique. — Connaissant ainsi la longueur d'onde du mouvement vibratoire électrique ($\lambda = \varepsilon$) d'une part, et d'autre part, par une étude précédente, l'expression de la période de vibration ionique ou électronique T, on en déduit immédiatement la vitesse de propagation du phénomène électrique V.

$$U = \frac{\lambda}{T} = \frac{\varepsilon}{\frac{\beta}{\alpha} \times 4\pi \times k \times \frac{\sqrt{M}}{S} \times \varepsilon^{\frac{3}{2}}} = \frac{\alpha}{\beta} \times \frac{1}{4\pi} \times \sqrt{K} \times \frac{S}{\sqrt{M}} \times \frac{1}{\varepsilon^{\frac{1}{2}}}$$

$$= \frac{\alpha}{\beta} \times \frac{1}{4\pi} \times \sqrt{K} \times \frac{S}{\sqrt{M}} \times \left(\frac{n}{V}\right)^{\frac{1}{6}}.$$

On voit, d'après cette relation, que la vitesse de propagation du phénomène électrique n'est pas constante, et, comme celle de la lumière, qu'elle varie avec le milieu traversé (*indice de réfraction*).

La vitesse de propagation du phénomène électrique est notamment proportionnelle à la racine carrée du pouvoir inducteur spécifique K du milieu diélectrique, et à la puissance $\frac{1}{6}$ de la concentration en ions ou électrons.

Vérification expérimentale. — En mesurant la vitesse de transmission télégraphique d'un courant (déduction faite des retards mécaniques d'appareils) dans des fils aériens, dont la capacité est très faible et n'apporte pas de perturbations par trop considérables sur la mesure, et en opérant d'ailleurs dans les mêmes conditions, MM. Fizeau et Gounelle [2] ont trouvé les chiffres suivants :

Fil de fer	100 000 kilomètres par seconde.
Fil de cuivre	180 000 » »

Or, d'après la résistivité spécifique du fer et du cuivre, on a trouvé précédemment comme quantité proportionnelle à la concentration $\frac{n}{v}$ du métal en électrons [3].

Fer recuit	0,01077, soit 1
Cuivre pour étalon recuit	0,3921, soit 39.

---

(1) *L'Éclairage Électrique*, 1906, t. XLVIII, n° 29, p. 86.
(2) Annuaire du Bureau des Longitudes, 1906, p. 627.
(3) *L'Éclairage Électrique*, 1906, t. XLVIII, n° 32, p. 210.

On en déduit :

$$\frac{\text{Vitesse de propagation dans le cuivre}}{\text{Vitesse de propagation dans le fer}} = \frac{\sqrt[6]{39}}{\sqrt[6]{1}} = \frac{1.84}{1},$$

c'est-à-dire que, si la vitesse de propagation du phénomène électrique est de 100 000 kilomètres par seconde dans le fer, elle est de 184 000 kilomètres par seconde environ dans le cuivre.

La vérification expérimentale est donc très nette.

En considérant l'expression :

$$U = \frac{\alpha}{\beta} \times \frac{1}{4\pi} \times \frac{1}{k} \times \frac{S}{\sqrt{M}} \times \frac{1}{\varepsilon^{\frac{1}{2}}},$$

on voit que k (k = racine carré de la constante d'attraction k^2 de la loi de Coulomb) et U sont inversement proportionnels, toutes choses égales d'ailleurs. Or il résulte des théories de Maxwell que k est proportionnel à la vitesse de la lumière dans le diélectrique considéré. Il en résulte que la vitesse de propagation U des phénomènes électriques est d'autant plus grande, pour une même concentration en ions ou électrons, que le milieu diélectrique conduit moins bien la lumière. On retrouve ici une conclusion de la théorie électromagnétique de la lumière, sur la relation entre l'opacité pour la lumière et la conductibilité électrique, et qui est vérifiée par les différents états allotropiques vitreux (rouge sombre) et cristallisé (gris) du sélénium [1].

G. Rosset.

LES CHARBONS ÉLECTRIQUES

Les premiers charbons qui ont été utilisés en électricité étaient simplement constitués par du charbon de bois ; dans ses expériences sur l'arc voltaïque, effectuées en 1801, Davy se servait de deux tiges de charbon de bois taillées en pointe et préalablement éteintes dans l'eau ou le mercure. Ces charbons avaient le grave inconvénient de se consumer trop vite, ce qui obligeait à opérer dans le vide, chaque fois que l'on voulait obtenir un éclairage de longue durée ; de plus, ils possédaient une dureté insuffisante et contenaient un grand nombre d'impuretés. Vers 1840, Foucault trouva, dans les dépôts formés dans les cornues à gaz, un charbon dur et conducteur pouvant être taillé en baguettes ; il brûlait du reste assez lentement à l'air, ce qui dispensait d'opérer dans le vide ; malheureusement, le prix de revient en était considérable et la production trop faible ; il manquait aussi d'homogénéité, renfermait des matières terreuses, principalement de la silice qui, en fondant, faisait souvent éclater le charbon et produisait des sifflements.

On chercha alors à produire un charbon artificiel ; ce fut Bunsen qui résolut ce problème en fabricant, pour sa pile, des agglomérats formés par de la houille sèche finement pulvérisée et mélangée avec de la colle ; le tout était cuit au four, à la plus haute température possible et à l'abri du contact de l'air ou de corps oxydants, puis trempé dans du sirop de sucre, cuit de nouveau et ainsi de suite jusqu'à ce que le charbon fût devenu absolument compact et d'aspect uniforme.

---

(1) Towsend. Expériences photométriques sur le Sélénium, *L'Éclairage Électrique*, 1905, t. XLII, n° 10, p. 392.

En 1846, Staite et Edwards firent breveter un procédé analogue pour la fabrication des charbons destinés à la lumière électrique. Beaucoup plus tard, Jacquelain obtint des charbons très purs au moyen du goudron de houille ; mais il ne put réussir à installer une fabrication pratique, pas plus qu'Archereau, à qui l'on doit cependant le procédé de la fabrication à la filière. Le Molt se servit également du goudron et de différentes poudres de charbon qu'il purifiait en les immergeant dans des acides. C'est Carré qui arriva le premier à une production véritablement industrielle de ces charbons, principalement par l'emploi d'une presse hydraulique pour le passage à la filière. La pâte qu'il employait se composait de coke, de noir de fumée calciné et d'un sirop de sucre comprenant 30 parties de cette substance pour 12 de gomme, les proportions des trois composants du mélange étant ainsi réparties :

Coke très pur en poudre fine.	15	parties
Noir de fumée calciné	5	—
Sirop de sucre.	7 à 8	—

La fabrication des charbons électriques par le procédé Jacquelain (1882), a été perfectionnée par l'inventeur lui-même qui chercha principalement à préparer un carbone à la fois plus conducteur que le charbon de bois calciné et exempt, autant que possible, de substances étrangères. Il utilisa pour cela trois méthodes différentes : l'action du chlore sec sur le carbone à la température du rouge blanc, l'action de la potasse ou de la soude caustique en fusion et enfin celle de l'acide fluorhydrique à la température ordinaire.

Sous la double influence du chlore et d'une température élevée, la silice, la magnésie, l'alumine, les oxydes alcalins et les oxydes métalliques sont détruits par leur transformation en chlorures volatils, tandis que l'hydrogène contenu dans le carbone passe à l'état d'acide chlorhydrique gazeux et s'échappe de même. Comme ce procédé était assez pénible lorsqu'on entreprenait de purifier de grandes masses de charbon de cornue, on simplifiait le travail en dirigeant d'abord un courant de chlore sec, pendant trente heures environ, sur quelques kilogrammes de charbon maintenus à la température du rouge blanc et taillés d'avance en crayons prismatiques.

Cette première opération laisse dans le carbone des vides assez nombreux qu'on cherche à combler en le soumettant à l'action comburante de composés hydrocarbonés, dont la vapeur circule lentement sur les crayons chauffés au rouge blanc, pendant cinq ou six heures, dans un cylindre en terre réfractaire. La réduction en vapeur du carbure d'hydrogène (huile lourde de houille) doit se faire de la façon la plus lente, afin que la décomposition se produise à une température suffisamment élevée et que le dépôt de charbon sur la paroi extérieure des crayons soit aussi faible que possible.

Le procédé à la soude caustique consiste à utiliser l'action de cette substance sur les matières étrangères du carbone, principalement sur la silice et l'alumine, en les convertissant en silicate et aluminate de potasse ; par différents lavages à l'eau chaude distillée et à l'acide chorhydrique bouillant, on peut parvenir à faire disparaître ainsi toute trace d'oxyde de fer ainsi que les bases terreuses, et l'on obtient finalement des crayons de très bonne qualité.

Le procédé à l'acide fluorhydrique consiste simplement à immerger les crayons taillés, pendant une ou deux journées, dans le liquide étendu de deux fois son poids d'eau à la température de 20° environ. On lave ensuite à grande eau, on sèche et l'on soumet le carbone ainsi purifié à une carburation de trois ou quatre heures, si les matières enlevées par l'acide fluorhydrique sont en faible proportion.

Jacquelain a également cherché à préparer directement du carbone pur *graphitoïde*. Se basant sur ce principe de chimie que toute substance organique volatile peut fournir, en se décomposant par la chaleur, du carbone en petits feuillets miroitants et très minces, ce chimiste a étendu cette propriété des composés carbonés à la fabrication de charbons destinés à la production de la lumière électrique.

Tous les carbures d'hydrogène fournis par la décomposition en vase clos, de la houille, des tourbes, des schistes, des résines et même des végétaux, se prêtent à cette dissociation ainsi que l'essence de térébenthine et la naphtaline. Le goudron permet également d'obtenir un carbone brillant, sonore, à cassure homogène et possédant une structure granuleuse, semblable à celle de l'acier fondu. Le pouvoir lumineux et la fixité de l'arc électrique s'accroissent en même temps que la densité du carbone employé, sa dureté et sa pureté.

Le graphite Alibert jouit de la propriété singulière d'acquérir par la purification un pouvoir lumineux double de celui qu'il présente à l'état naturel, pouvoir qui dépasse d'un sixième celui des carbones purs artificiels.

Les principaux carbones employés par Jacquelain sont donc : le graphite Alibert non purifié, donnant un affaiblissement très fréquent de la lumière et rougissant facilement ; le charbon de cornue purifié par la potasse, donnant une clarté invariable et rougissant presque en entier ; le charbon de cornue non purifié donnant des affaiblissements très fréquents de la lumière et rougissant peu ; le même purifié par l'acide fluorhydrique, donnant quelques affaiblissements de lumière ; le carbone non brillant et plus dur, donnant une clarté invariable, maintenant fixe la lumière de l'arc et rougissant très peu ; le carbone pur et brillant donnant de même une clarté invariable et rougissant peu ; enfin, le carbone ou graphite de Sibérie purifié par l'acide fluorhydrique, donnant de rares affaiblissements de lumière, causés presque toujours par le déplacement de l'arc voltaïque.

Les charbons que l'on fabrique aujourd'hui dans l'industrie électrique sont formés d'une pâte dont la base essentielle et dominante est le charbon de cornue soigneusement trié et débarrassé des scories ; on recueille les grains qui sont passés sous une meule et l'on obtient ainsi une poudre que l'on tamise et que l'on débarrasse de toutes ses impuretés ; on mélange ensuite à chaud la poudre avec du goudron, afin de bien faire tenir la masse et d'en former une pâte homogène. Puis, on utilise une pression pouvant dépasser 250 kilogrammes par centimètre carré et qui a pour but de rendre la masse plus compacte ; les crayons de charbon sortent alors par une filière dont les trous ont des dimensions variables selon les résultats à obtenir. Enfin, ces crayons sont cuits à une température de 1 600° environ, dans des creusets en terre réfractaire, pendant un temps très long.

Très souvent, les charbons modernes sont munis d'un cylindre central appelé *mèche* (ou âme), qui est d'un très faible diamètre et qui présente une composition chimique différente de celle du charbon qui l'entoure. Ces charbons se taillent beaucoup plus facilement que les précédents et donnent un arc plus régulier ; l'âme est composée d'un charbon tendre mélangé de sels (silicates de potasse et de soude), dont les vapeurs, en se mélangeant à celle de l'arc, augmentent sa conductibilité et permettent d'opérer à des tensions inférieures à celles que l'on utilisait autrefois.

On emploie de même assez couramment, aujourd'hui, des charbons électriques dits *métallisés* qui permettent d'obtenir d'une lampe toutes les qualités qu'on peut en exiger tant au point de vue de l'économie des charbons que de la quantite de lumière qu'elle doit fournir. On fabrique pour cela des cylindres dont la pâte charbonneuse est additionnée de sels minéraux ayant pour but d'augmenter le rendement lumineux de l'arc ; on peut faire varier la base du sel de manière à obtenir des lumières diversement colorées, suivant l'usage qu'on

veut en faire. D'après M. Wedding, le meilleur pourcentage de métallisation pour le charbon positif est de 15 % environ.

Le sel le plus avantageux que l'on connaisse, au point de vue de la régularité de la lumière, est le *Spath fluor,* encore appelé fluorine ou fluorure de calcium ; mais malheureusement, il donne une teinte jaunâtre qui devient trop rouge lorsque l'arc fonctionne sous une trop forte densité de courant. Bremer a indiqué [1] l'addition de sels fondants, tels que le bore, la soude, la potasse, les silicates, afin d'éviter les boursouflements et de faire mieux couler les scories produites lors de la volatilisation du carbone dans l'arc. On peut aussi ajouter certains sels de calcium, tels que les fluorure, oxyde, carbonate, phosphate, qui jouent le rôle de substances régulatrices en évitant les variations brusques d'intensité lumineuse ; c'est ainsi que les borates de baryum, de strontium, de magnésium, d'aluminium, donnent de très bons résultats en régularisant la fusion et la volatilisation des sels réfractaires.

M. Blondel, qui a entrepris de nombreuses et fructueuses recherches sur cette importante question, a effectué des expériences dans le but de contrôler les essais de ses prédécesseurs et d'apporter de nouvelles données pratiques à ce sujet [2]. Il a étudié plus spécialement l'arc produit entre des charbons purs, l'arc produit entre des métaux, l'arc produit entre des oxydes ou des composés de métaux purs et enfin l'arc produit entre des électrodes mixtes, composées de charbons mélangés avec différentes substances minérales. Il a pu constater d'abord les avantages que présentent les charbons minéralisés sur les charbons purs, et qui sont les suivants :

1° Ils réduisent la combustion des charbons ;

2° Ils augmentent la conductibilité de l'arc ;

3° Ils suppriment les à-coups pendant la marche de la lampe ;

4° Ils augmentent le rendement lumineux de l'arc.

Au cours de ses propres recherches, il a été amené à construire un type de lampe, d'un genre nouveau ; son appareil diffère principalement des lampes à arc jusque-là employées par un angle d'éclairement plus grand et par une grande rapidité d'action ; les charbons utilisés par lui sont généralement composés de bases alcalines qui donnent toujours de meilleurs résultats que les autres sels au point de vue de la production de lumière. Au point de vue de l'économie, la lampe Blondel présente sur les autres modèles à charbons convergents les avantages suivants :

1° Le mécanisme en est très simple et ne demande pas d'arrangement spécial ;

2° La lumière qu'elle produit s'étale dans un champ plus vaste que pour les autres lampes, ce qui permet de l'employer avec succès dans les éclairages publics ;

3° Les variations d'intensité lumineuse et les changements de coloration de la flamme y sont beaucoup moins fréquentes que dans les autres systèmes.

*
* *

La fabrication des charbons électriques, telle qu'elle est entreprise aujourd'hui dans les grandes usines qui s'occupent de cette industrie [3], comprend plusieurs catégories de charbons suivant leur destination et pouvant être classés de la manière suivante :

---

[1] Voir *Éclairage Électrique*, tome XXXVIII, 27 février 1904, p. CII.

[2] *Blondel*. — Propriétés et applications industrielles de l'arc électrique produit au moyen d'électrodes composées de charbon mélangé avec des substances minérales (Communication au Congrès international d'électricité de Saint-Louis). — Voir également les *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, décembre 1898 (*Eclairage Electrique*, tome XVIII, 7 janvier 1899, page 32), mars 1899 (*Eclairage Electrique*, tome XIX, 10 juin 1899, page 396) et décembre 1899, ainsi que *Revue générale des Sciences*, 31 juillet 1901.

[3] Voir dans l'*Eclairage Electrique*, tome XLI, 8 octobre 1904, page 49, l'article de M. E. Ohstein : *Progrès récents dans la fabrication des charbons artificiels*.

1° Charbons à lumière, comprenant les charbons pour lampes à arc à courant continu, pour lampes alternatives, pour lampes en vase clos, pour projecteurs, phares, signaux, etc. ;

2° Balais-frotteurs en charbon, utilisés dans la construction et le fonctionnement des machines dynamos à courant continu, des électromoteurs, des moteurs de tramways, des alternateurs et des moteurs à courant alternatif ;

3° Charbons pour électrolyse et pour piles ainsi que plaques et cylindres de charbon ;

4° Charbons pour appareillage électrique comprenant à la fois ceux qui sont utilisés dans la fabrication des pare-étincelles et des parafoudres, et ceux qui servent comme résistance dans les appareils de chauffage électrique ;

5° Charbons destinés à des usages divers et fabriqués sous forme de barreaux, plaques, cylindres, tubes, manchons, crayons de mince diamètre.

La fabrication de ces charbons s'opère au moyen de fours spéciaux de grandes dimensions et à gazogène, permettant d'atteindre, avec toutes les graduations possibles, les températures les plus élevées, qui sont dû reste indispensables pour obtenir des substances ayant à la fois une grande dureté et une haute conductibilité électrique. On doit de plus attacher toujours une grande importance au choix des matières premières, afin qu'elles soient très pures et très uniformément mélangées ; en opérant sur de grandes quantités de ces substances, on parvient à réaliser une parfaite régularité dans la marche de l'opération.

Les crayons pour lampes à arc possèdent des qualités variables selon les objets auxquels ils sont destinés ; c'est ainsi qu'on en fabrique généralement de deux marques : l'une à grain fin, recuite à une très haute température et destinée surtout à toutes les applications où l'on tient à réaliser un éclairage d'une fixité aussi parfaite que possible, et l'autre à grain plus grossier, destinée principalement aux lampes employées dans les services publics, les chantiers, les usines métallurgiques, les scieries et en général dans les entreprises industrielles.

Les balais des collecteurs de dynamos doivent être composés de charbon à grande finesse de grain afin d'éviter totalement, si possible, l'usure des collecteurs et ils doivent toujours posséder une parfaite conductibilité. Pour réaliser ces conditions, on cherche principalement à les rendre denses et homogènes, afin qu'ils possèdent un aspect poli, donnant avec le collecteur un contact doux, sans l'encrasser cependant pendant la marche et sans produire de poussières capables, par leur seule présence, d'endommager fortement la machine. Les blocs fabriqués sont, pour cette raison, presque toujours moulés individuellement, comprimés à la presse hydraulique et divisés ensuite en fragments de taille appropriée aux usages qu'on veut en faire.

On fabrique deux catégories de balais en charbon : les premiers sont à haute conductibilité et conviennent surtout aux machines à basse tension et à grande intensité, ou aux bagues d'alternateurs asynchrones ; on les emploie en général pour toutes les applications nécessitant une grande densité de courant ; les seconds sont assez résistants et s'emploient uniquement pour les machines à haute tension, pour le matériel des tramways, lorsqu'on veut éviter la projection de poussière et les dépôts adhérents de charbon.

Mais il est bien évident que, pour que les balais ainsi constitués rendent tous les services qu'on en attend, il faut que l'arbre de la machine et le collecteur tournent parfaitement ronds et que ce dernier ne présente aucune aspérité afin que les blocs de charbon épousent parfaitement sa forme ; il est de même nécessaire que les balais soient bien ajustés et bien serrés dans les pièces qui les supportent.

Pour leur donner la forme concave qu'ils devront ensuite conserver pendant le fonctionnement de la machine, il faut, après les avoir mis en place, les appuyer fortement sur le

collecteur et faire passer entre celui-ci et les balais une toile de verre ou d'émeri, la partie émerisée étant tournée du côté du bloc en charbon. On imprime à la toile un mouvement de va-et-vient jusqu'à ce que les balais, suffisamment usés, aient pris la courbure du collecteur. On nettoie ensuite celui-ci et l'on donne aux balais une pression modérée, de manière à supprimer toutes les aspérités qui pourraient se produire sur la surface du collecteur.

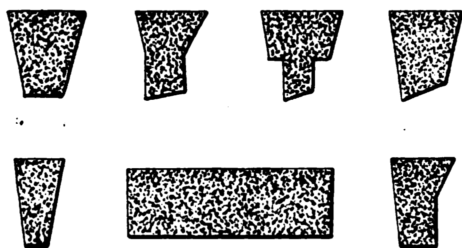


Fig. 1. — Charbons électriques.

Il faut naturellement que la largeur des charbons employés soit en rapport avec la tension et l'intensité du courant, de même qu'avec la largeur des lames du collecteur, afin qu'ils ne puissent recouvrir simultanément plus de trois lames métalliques consécutives de celui-ci. Ces balais peuvent posséder des formes très variées, selon le type de machines auxquelles on les adapte; leur forme générale est celle d'un trapèze (fig. 1) plus ou moins régulier et plus ou moins modifié par l'adjonction de petits côtés.

*
* *

Outre les charbons que nous venons d'étudier, on fabrique aujourd'hui dans l'industrie, une grande quantité de charbons dits *graphitiques*, dont les usages ont pris rapidement une grande extension et dont la préparation est basée sur la transformation du carbone amorphe en graphite. Mais bien que ce soit là le principe de cette fabrication, il y a lieu d'y ajouter la dissociation des composés carburés sous l'influence de la chaleur, ces deux actions pouvant se produire simultanément, comme nous allons le voir par la description sommaire des deux procédés actuellement employés.

1° *Procédé Griard et Street.* — MM. Girard et Street ont imaginé un appareil (fig. 2) destiné à transformer le carbone en graphite et qui a reçu une importante application dans la préparation des charbons « électrographitiques ». La matière première servant à cette fabrication est le carbone amorphe, plus ou moins aggloméré, ayant la forme de barres assez épaisses et destinées ensuite, après leur transformation, à être découpées en fragments qui serviront à la fabrication de pièces de toutes sortes, telles que balais pour dynamos, cylindres et tiges de charbon, etc...

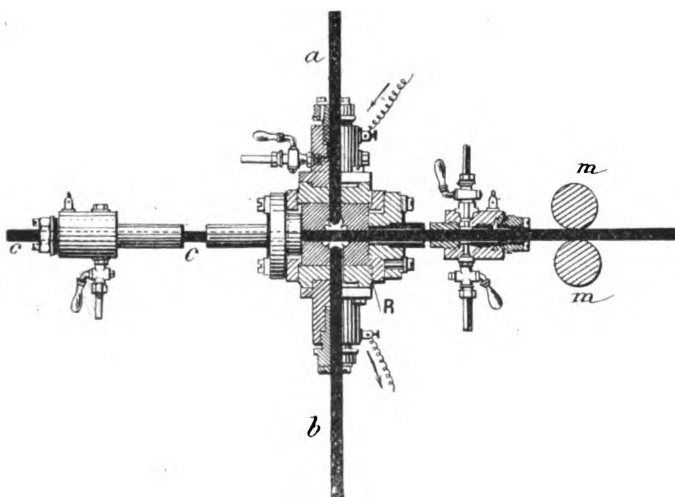


Fig. 2. — Appareil Girard et Street, pour la préparation industrielle des charbons électro-graphitiques.

L'appareil se compose essentiellement d'un bloc en matière réfractaire formé d'une ou plusieurs parties maintenues par une enveloppe métallique extérieure et dans lequel se trouve un parallélipipède de charbon percé d'une cavité qui constitue la chambre de chauffe proprement dite. Suivant l'axe du four, se trouve un orifice cylindrique ou rectangulaire, sorte de canal dans lequel on introduit la barre à

traiter. Celle-ci est animée d'un mouvement de translation, qui lui fait traverser le four avec une vitesse qui doit être fonction de sa masse et de la température à laquelle on désire la porter.

Un second canal, disposé perpendiculairement au premier et aboutissant également à la chambre de chauffe, sert à loger deux électrodes de charbon arrivant de chaque côté de la pièce à graphiter et formant avec elle un double arc. Malgré le mouvement continu de translation de la pièce mobile, on comprend facilement que cet arc puisse se maintenir constamment fixe, en portant les points de deux génératrices opposées à une très haute température. Étant donnée l'exiguïté de la chambre centrale de chauffe, on peut admettre, si la vitesse de translation est assez faible, que la température est sensiblement la même en tous ses points.

Le mouvement de translation de la pièce à traiter est produit au moyen de cylindres ou de galets d'entraînement actionnés par un moteur électrique. Les électrodes et la barre à transformer en graphite sont munies, à leur entrée dans l'appareil, de presse-étoupes destinées à fermer hermétiquement celui-ci dans le cas où l'on voudrait opérer dans un milieu gazeux, quel qu'il soit. La distance des électrodes et par suite la longueur de l'arc peuvent être maintenues constantes au moyen de dispositifs semblables à ceux que l'on emploie dans le réglage des lampes à arc.

Avant leur entrée et après leur sortie de la chambre de chauffe, les pièces à traiter traversent un tube destiné à les chauffer et à les refroidir ensuite ; des presse-étoupes existent également aux extrémités de ces tubes. L'appareil peut fonctionner d'une manière continue puisque les barres de charbon se succèdent elles-mêmes sans interruption.

Dans le cas que nous venons d'examiner, l'arc jaillit simplement entre deux tiges de charbon réliées aux pôles d'une dynamo ; mais on peut également supprimer un charbon et faire communiquer celui qui reste à l'un des pôles de la machine, l'autre pôle étant en rapport avec la pièce en mouvement et le courant électrique lui arrivant à l'aide d'un frotteur ; l'arc jaillit alors entre le charbon et la barre mobile et se maintient fixe comme précédemment. MM. Girard et Street ont également imaginé un dispositif qui permet d'obtenir deux arcs au lieu d'un seul : pour cela, ils placent les charbons en série avec la pièce à traiter qui sert d'électrode commune aux deux arcs. Dans le cas où l'on désire chauffer des matières pulvérulentes, on dispose dans le canal un tube de charbon fermé à ses deux extrémités et contenant la matière à transformer ; ce cylindre subit un mouvement de translation semblable à celui de la barre précédente. Enfin, ces ingénieurs ont employé un dispositif qui permet à la substance en traitement d'être mise en mouvement au sein d'une enveloppe qui reste fixe, au lieu de se mouvoir comme précédemment avec le cylindre qui l'entoure ; ce dispositif consiste à employer comme chambre de chauffe un charbon tubulaire servant à la fois d'électrode et de récipient.

Dans ces appareils, quels que soient les détails de construction qui les différencient, on peut répartir uniformément la chaleur de l'arc sur les substançes à traiter, en utilisant la propriété que possède un champ magnétique d'imprimer un mouvement de rotation à l'arc ; celui-ci tourne à l'intérieur de l'appareil, dans lequel on produit un champ magnétique suffisant. On emploie généralement, dans ces fours, l'arc à courant alternatif lorsque la pièce à traiter se meut entre deux électrodes fixes, et l'arc à courant continu, lorsque c'est l'arc lui-même qui est animé d'un mouvement de rotation.

2° *Procédé Acheson.* — L'appareil qui a été imaginé par M. Acheson (fig. 3) pour la fabrication industrielle du carborundum, au moyen de sable, de sel marin, de sciure de bois et de coke pulvérisé permet d'obtenir du charbon graphitique en grande quantité par la transfor-

mation de la couche centrale de coke en graphite, une fois le travail terminé ; autour de cette âme, il existe également dans la partie la plus chauffée du mélange une couche de graphite en cristaux capables de s'aplatir entre les doigts et de laisser une tache noire sur le papier.

Cette formation de graphite peut être expliquée de la manière suivante : par suite de la haute température qui règne dans l'appareil, le siliciure de carbone qui se forme à chaque instant est dissocié en partie, le silicium se volatilisant facilement et le carbone restant seul dans le four sous forme de graphite. Mais ce qu'il est curieux de remarquer dans cette production de graphite, c'est la formation possible de celui-ci malgré une quantité insuffisante de silice pour transformer le carbure en graphite. Ce phénomène peut être interprété de la façon suivante : la silice, en agissant sur le carbone amorphe qui est ici représenté par du coke, forme avec une partie de celui-ci du siliciure de carbone ; à son tour, celui-ci donne un résidu de graphite par sa dissociation, tandis que le silicium libre agit sur l'élément voisin de carbone et reforme avec lui une nouvelle quantité de siliciure et ainsi de suite. Le silicium n'est donc ici qu'un agent de transformation d'une variété amorphe de carbone (coke) en une variété cristallisée et stable (graphite) pouvant seulement prendre naissance par l'action d'une très haute température.

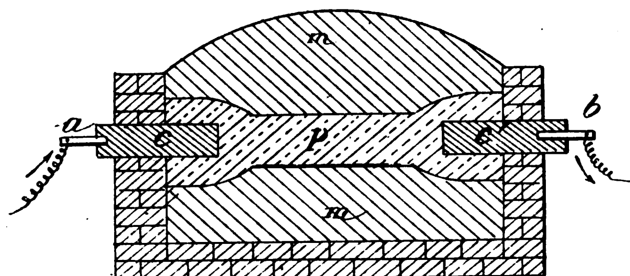


Fig. 3. — Appareil Acheson pour la transformation industrielle du carbone en graphite.

On peut donc, par ce procédé vraiment ingénieux, transformer une grande quantité de carbone amorphe en graphite. En effectuant de multiples expériences dans le but d'étudier les conditions les plus favorables à cette production de graphite, on a remarqué que la graphitation de la couche centrale de coke est d'autant plus complète que le carbone dont elle est constituée renferme plus d'impuretés. Ce rôle des impuretés s'explique de la même façon que celui du silicium : étant toujours constituées par de la silice, de l'alumine ou de l'oxyde de fer, elles donnent lieu à des combinaisons dissociables qui laissent ensuite un résidu de graphite. En partant d'un anthracite contenant environ 6 °/₀ de cendres, on arrive à produire un graphite n'en possédant que de 0,03 à 0,04 °/₀, ce qui rend très acceptable la théorie précédente.

Dans cette fabrication, on emploie généralement des anthracites renfermant de 25 à 30 °/₀ de cendres ou encore les résidus provenant de la préparation du carborundum. Il faut que ces impuretés soient répandues dans la masse du charbon d'une façon à peu près homogène, pour que la transformation puisse s'opérer convenablement : c'est pourquoi les charbons minéraux, dans lesquels les impuretés ne sont pas disséminées uniformément dans la masse, tels par exemple que les charbons bitumineux et schisteux, ne peuvent convenir à cette fabrication.

Pour opérer pratiquement cette transformation, on moule d'abord les objets à transformer en graphite ; si, par exemple, on désire fabriquer des électrodes, on prend un mélange contenant du charbon et 3 °/₀ d'oxyde de fer ou mieux encore un anthracite riche en cendres ; après un moulage et une bonne cuisson, on le place dans le four et la transformation s'y effectue rapidement au moyen d'un courant allant de 300 à 1 000 ampères. Les impuretés du charbon primitif ne se retrouvent pas dans le graphite obtenu et celui-ci est d'une pureté parfaite.

La société « Le Carbone » fabrique des charbons graphitiques de dimensions assez considérables, allant jusqu'à 30 centimètres de diamètre (section ronde), 35×35 centimètres (section carrée) et 45×10 centimètres (section rectangulaire). Les électrodes ainsi préparées sont remarquables par leur densité, leur homogénéité et leur résistance aux divers électrolytes ; leur résistivité est de deux fois et demie à trois fois plus faible que celle des charbons non fabriqués par ce procédé. Le charbon, de marque X, possède un grain particulièrement fin, une homogénéité parfaite, une grande consistance et une résistance au contact beaucoup plus faible que les charbons jusque-là utilisés. On peut l'employer avantageusement, grâce à ces propriétés, pour la fabrication des balais pour dynamos, supportant des densités de courant de 15 à 20 ampères par centimètre carré de surface frottante ; la dureté de ce charbon est assez grande pour que l'on n'ait pas à craindre l'encrassement des collecteurs pour une cause purement mécanique, même avec une pression assez forte du porte-balai ; les frottements sont extrêmement doux et l'usure du collecteur pratiquement nulle ; la marque EGZ offre moins d'avantages en ce qui concerne sa conductibilité ; mais elle convient très bien à la construction des balais pour dynamos à haut voltage ; en raison de sa dureté plus faible que la précédente, elle ne doit pas subir de pression exagérée de la part du porte-balai.

L'usure des électrodes, dans l'appareil Girard et Street, est extrêmement réduite : elle est de 5 millimètres environ par heure, pour un courant de 300 ampères et pour des électrodes de 40 millimètres de diamètre. Il est évident qu'étant données la vitesse de translation et l'intensité du courant, la facilité du charbon à se transformer en graphite varie avec la substance employée. La densité d'un charbon de 14 millimètres, qui est de 1,98 avant sa transformation, atteint 2,60 à sa sortie du four, la proportion de graphite pur dans ce charbon étant de 85 °/₀ environ ; un échantillon de 15 millimètres acquiert après le traitement, une densité de 2,36, la proportion de graphite étant de 80 °/₀.

Les charbons que l'on emploie généralement pour la construction des électrodes de fours électriques peuvent avoir la même constitution que les charbons à éclairage, mais le plus souvent, ils sont fortement graphitiques ; cependant, étant données leurs dimensions, ils sont plus faciles à fabriquer et d'un prix plus modeste par unité de volume ; on les livre généralement sous forme de gros cylindres ayant environ 1 mètre ou $1^m,50$ de longueur et 15 centimètres de diamètre.

L'emploi des charbons de plus grandes dimensions n'est pas à recommander : lorsque l'intensité du courant demande une forte section, il est préférable de réunir plusieurs baguettes de manière à former un faisceau, lequel convient mieux qu'un cylindre unique de même diamètre. Pour la production de l'aluminium, M. Minet utilisait comme anode, pour un courant de 4000 ampères, huit baguettes de charbon ayant chacune une section de 100 centimètres carrés et une hauteur de 40 centimètres. Un grand nombre de métallurgistes fabriquent du reste aujourd'hui eux-mêmes leurs électrodes : tel est, en particulier, le cas de la Société électrométallurgique française qui a entrepris, à Froges, dans l'Isère, la fabrication électrothermique de l'acier et de l'aluminium.

La fabrication des charbons destinés à l'électrolyse est plus délicate, car il est nécessaire que ceux-ci offrent la plus grande résistance possible à l'attaque de l'électrolyte : on est parvenu à ce résultat en préparant des charbons se rapprochant de la structure graphitique. M. Lessing a fait dernièrement des recherches dans le but d'obtenir des anodes en charbon chimiquement pur, ayant une parfaite homogénéité et une grande conductibilité ; leur seul inconvénient est de posséder une dureté insuffisante et d'être d'un prix de revient élevé.

Jean Escard.

SUR LES PYROMÈTRES THERMO-ÉLECTRIQUES

Dans une précédente note [1], nous avons passé rapidement en revue les principaux appareils employés pour la mesure des températures élevées, et nous avons cité différents modèles de pyromètres thermo-électriques du type Le Châtelier sans entrer dans le détail de ces appareils et des galvanomètres employés industriellement avec eux. Pour compléter cette étude, nous allons décrire les types les plus nouveaux et indiquer les solutions adoptées pour en rendre l'emploi économique et tout à fait industriel.

Pyromètres J. Carpentier.

Les pyromètres destinés à la mesure des températures jusqu'à 1600° consistent en un couple thermo-électrique Le Châtelier en platine et platine rhodié ou iridié placé dans des tubes réfractaires que protège généralement une canne en fer. Les fils qui constituent le couple ont $0^{mm},5$ de diamètre : les bornes de l'appareil sont fixées à une poignée en bois.

Les principaux perfectionnements réalisés dans les dernières années ont porté sur le galvanomètre, qui doit être un appareil sensible, robuste et le plus résistant possible, afin que la résistance du couple et des conducteurs soit négligeable par rapport à sa résistance intérieure.

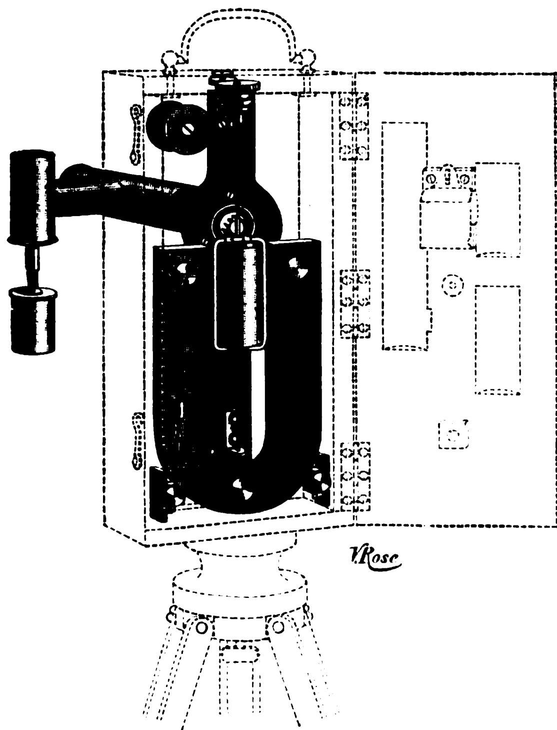


Fig. 1. — Galvanomètre à suspension pour pyromètre thermo-électrique.

M. J. Carpentier est parvenu à établir des galvanomètres portatifs robustes à suspension. L'un d'eux, à microscope (fig. 1), est supporté par un pied à trois branches analogue à celui d'un appareil de photographie. Le cadre est bobiné avec du fil de maillechort, de façon que les variations de la résistance avec la température soient négligeables. Les fils de supension sont remplacés par des ressorts à boudin très légers. Le cadre est soutenu, pendant le transport, par un système de relevage. L'échelle micrométrique est fixe par rapport au système mobile, ce qui évite la nécessité d'étalonner l'appareil à chaque nouvelle installation. Cette échelle est divisée en 120 parties : la déviation totale est obtenue pour une différence de potentiel de 15 millivolts environ, correspondant à une température de 900°. Pour la mesure des températures plus élevées, on a prévu dans le galvanomètre une résistance additionnelle égale à la résistance du cadre, et qui réduit de moitié la sensibilité de l'appareil.

Pour les applications industrielles, où le maniement de l'appareil doit pouvoir être confié à

[1] Voir *Eclairage Electrique*, tome XLVI, 31 mars 1906, page 484.

n'importe quel ouvrier, le pyromètre à microscope est trop délicat. La maison Carpentier a établi, pour cela, un galvanomètre à cadre mobile (fig. 2) dont la suspension est formée d'un fil plat. Le cadre porte une aiguille qui se déplace devant une échelle graduée en degrés centigrades. L'appareil, facilement transportable grâce au système de relevage du cadre, peut être placé sur une table ou sur un support quelconque à peu près horizontal, ne présentant pas de trépidation. Trois vis calantes permettent, avec le secours de deux niveaux à bulle d'air, de rendre l'appareil horizontal. Le galvanomètre, d'une grande sensibilité, est muni d'une résistance en manganin reliée en série avec le cadre : le coefficient de température est absolument négligeable, ainsi que la résistance des conducteurs de jonction.

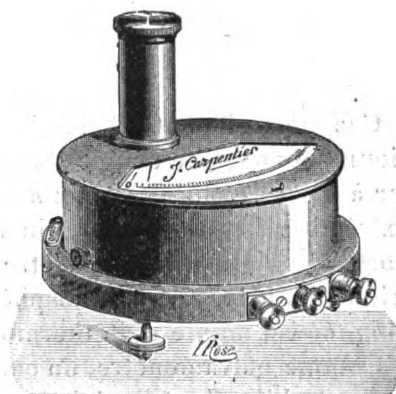


Fig. 2.

Pour les températures inférieures ou égales à 1 000°, le pyromètre construit par la maison Carpentier est beaucoup plus robuste, plus simple et d'un prix moins élevé. Le couple thermo-électrique comprend une lame de fer ou de cuivre et plusieurs fils de constantan, isolés par du carton d'amiante.

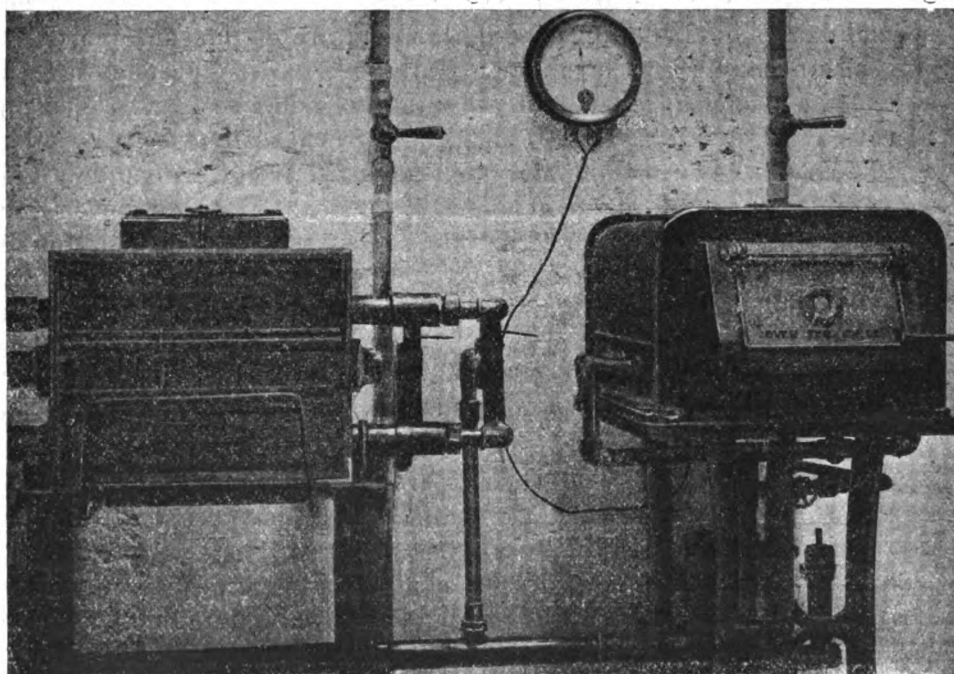


Fig. 3. — Pyromètre industriel pour températures inférieures à 1 000°.

Un thermomètre, fixé à la poignée de bois qui porte les bornes permet de connaître la température de la soudure froide que l'on doit ajouter à l'indication de l'appareil pour déterminer la température de la soudure chaude. La force électromotrice de ce couple étant considérable, il suffit d'employer comme galvanomètre un millivoltmètre à cadre mobile et à pivots gradué en degrés centigrades. La figure 3 représente cet appareil, que l'on doit

placer verticalement à proximité du four dont on veut connaître la température. L'emploi de ces appareils à pivots est tout à fait pratique et simple dans l'industrie et peut rendre de très grands services pour tous les fours à décaper, à recuire, à tremper, etc.

Pyromètres Chauvin et Arnoux.

Ces appareils ont été établis surtout en vue de la robustesse. Pour les températures inférieures à 1 000°, le couple thermo-électrique est un couple fer-alliage spécial. Un tube en fer à parois épaisses contient un fil d'alliage de cuivre, nickel et manganèse, soudé à son extrémité. Le tube de fer, ainsi que le fil intérieur, sont reliés aux bornes de jonction que porte la poignée du pyromètre. La soudure du tube de fer et du fil d'alliage est faite electriquement dans une atmosphère réductrice, ce qui lui assure une grande solidité. La poignée est munie d'un thermomètre faisant connaître la température de la soudure froide.

Comme galvanomètre, on emploie avec ce pyromètre un appareil à pivots, apériodique à cadre mobile, dont la résistance intérieure peut être faible grâce à la faible résistance du couple thermo-électrique. La sensibilité de cet appareil est due à l'emploi d'un champ magnétique très intense : l'aimant est muni d'un shunt magnétique qui permet d'effectuer les corrections dues à la variation de résistance du cadre galvanométrique et des conducteurs de jonction avec la température.

Pour les températures allant jusqu'à 1 600°, la maison Chauvin et Arnoux emploie un pyromètre spécial dans lequel la différence de température est mesurée en deux fois. Cet appareil comprend un couple Le Châtelier en platine-platine iridié constitué par des fils très courts et de gros diamètre, présentant par suite une faible résistance électrique et un faible prix de revient, et un second couple en fer-alliage en série avec le premier, et dont la soudure chaude est placée au même point que l'extrémité froide du couple au platine. Ce dernier couple donnant une f. é. m. beaucoup plus élevée que celle du couple au platine, on le shunte de façon à avoir la même différence de potentiel aux bornes du shunt pour une même différence de température. La différence de potentiel totale agissant sur le galvanomètre se compose de la f. é. m. du couple au platine $e = f(T - \theta)$ et de celle du couple fer-alliage $e' = f'(\theta - t)$, θ étant la température intermédiaire, T et t les températures extrêmes. L'alliage est tel que le couple fer-alliage présente une courbe semblable à celle du couple au platine pour les températures comprises entre t et θ. L'appareil mixte donne donc le même résultat que si l'on avait affaire à un couple au platine occupant toute la longueur et, par suite, très coûteux.

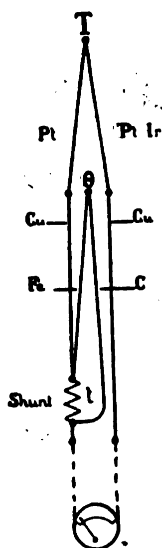


Fig. 4.

Le pyromètre est établi de la façon suivante : l'un des fils passe à travers un tube de porcelaine : l'ensemble des deux fils et de ce tube est recouvert par un second tube fermé, se raccordant à un tube de fer qui aboutit à la poignée. Dans ce tube passent deux fils de cuivre guipés avec de l'amiante, brasés au couple au platine, et un fil d'alliage soudé au tube de fer à la hauteur de l'extrémité froide du couple au platine. La figure 4 indique schématiquement la disposition des couples et des circuits de l'appareil.

Le galvanomètre employé avec ce pyromètre est le même que précédemment : cela est possible grâce à la faible résistance que présente le pyromètre établi avec l'artifice des deux couples en série. Comme on l'a dit plus haut, il faut effectuer certaines corrections sur le

galvanomètre, parce qu'une grande partie de la résistance du circuit est due au cadre galvanométrique, aux ressorts spiraux et aux conducteurs de jonction. La variation de résistance de ces différents conducteurs en cuivre avec la température est importante : on corrige les variations qu'elle ferait subir aux indications de l'appareil au moyen d'un shunt magnétique réglable, en faisant varier le flux proportionnellement à la variation de résistance du circuit. Cette variation de flux est obtenue par le déplacement d'une plaquette de fer doux que l'on approche plus ou moins des pôles de l'aimant; son mouvement est commandé par un bouton moleté avec un tambour gradué en degrés centigrades. Il suffit donc de lire les indications d'un thermomètre placé sur le cadran de l'appareil et de tourner le bouton moleté jusqu'à la température correspondante.

Pyromètres Bristol

Ces appareils, construits par la Cie Weston, sont établis avec des couples thermo-électriques de faible résistance et sont employés avec des millivoltmètres Weston à pivots.

Pour les températures inférieures à 1 100°, le couple thermo-électrique est en alliages spéciaux et produit une f. é. m. beaucoup plus élevée que celle du couple platine-platine rhodié : il présente une faible résistance électrique. Les alliages employés contiennent du tungstène, de l'acier, du nickel, du fer et du cuivre : leur composition est différente suivant les limites de température entre lesquelles les appareils doivent être utilisés. Ces alliages étant très peu coûteux, on peut employer des fils de forte section ; en outre la résistance varie très peu avec la température le long des éléments qui constituent le couple. Les conducteurs souples qui joignent le pyromètre au millivoltmètre ont une forte section, de façon que, dans cette partie du circuit aussi, la variation de résistance avec la température n'influe pas sensiblement sur les indications du galvanomètre.

Le couple thermo-électrique est séparable au point où il passe à travers la paroi du four ou du récipient dont on veut mesurer la température. Ce joint remplit un double but : en premier lieu, il est possible de remplacer facilement l'extrémité du couple soumise à la haute température ; en second lieu, on peut amener les extrémités froides de l'élément en un point où la température ambiante est constante et n'est pas influencée par la température à mesurer.

Les éléments qui constituent le couple sont isolés indépendamment les uns des autres par un revêtement en fil d'amiante recouvert d'un enduit au carborundum et d'une solution de silicate de soude. Il n'y a pas de tube protecteur en général, mais on peut, quand l'appareil doit fonctionner d'une façon continue au voisinage de 1 000°, le protéger au moyen d'un tube en nickel, en plombagine ou en porcelaine. La graduation du galvanomètre est effectuée d'après les points de fusion du plomb, du zinc, de l'aluminium et du cuivre.

Le nouveau couple thermo-électrique se prête bien à la détermination de la température des métaux fondus. Il suffit de déconnecter les extrémités du couple, dépourvues d'isolant, et de les plonger un peu dans le métal fondu qui établit entre elles une jonction conductrice : les indications sont les mêmes que si tous les éléments du couple étaient reliés. L'avantage de ce procédé est que les extrémités du couple atteignent immédiatement la température du métal fondu.

Pour des mesures précises, il est nécessaire de maintenir constante la température des extrémités froides. Pour cela, on emploie un compensateur formé d'une ampoule de verre à goulot étroit semblable à un thermomètre court. Deux fils de platine sont soudés dans le goulot en voisinage de son sommet. Ils sont reliés par une boucle en fil fin de platine plon-

geant dans le mercure. Les dimensions de l'ampoule et du fil sont variables suivant l'appareil employé. Si la température augmente, le mercure monte dans le goulot et court-circuite une portion de plus en plus grande de la boucle, réduisant ainsi la résistance du circuit total et compensant la diminution de f. é. m. du couple thermo-électrique due à l'élévation de température de l'extrémité froide. Quand la température diminue, le niveau du mercure baisse et le compensateur augmente la résistance du circuit.

Pour les températures atteignant 1 650°, le couple exposé à la pleine chaleur est un couple Le Châtelier au platine, ou un couple équivalent. Un second couple, établi avec les alliages précédents est en série avec le couple Le Châtelier qui s'étend jusqu'en un point où la température ne dépasse pas 700°. La figure 5 indique le montage employé. ABC est le couple Le Chatelier platine-platine rhodié : BCD le couple formé d'alliages peu coûteux. E est le compensateur dont il vient d'être question. Dans le système mixte ainsi réalisé, deux jonctions thermo-électriques B et C se trouvent introduites dans le circuit, mais les forces électromotrices engendrées en ces points peuvent être rendues égales et opposées par l'emploi d'alliages convenables. Des alliages de fer et de nickel donnent une compensation satisfaisante pour des températures allant jusqu'à 700° (en B et C). Il y a, pour les températures élevées, un petit excès de f. é. m. positive que l'on peut contre-balancer en introduisant dans le circuit, à proximité de la jonction secondaire, une résistance faite en métal dont la résistance électrique croît avec la température ; de cette façon, on peut réaliser un couple mixte (compound) dont l'ensemble fonctionne comme si le couple entier était en platine-platine rhodié.

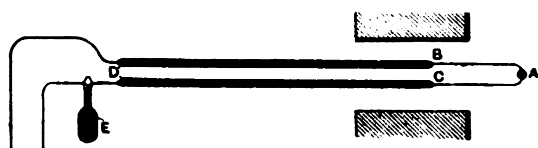


Fig. 5. — Pyromètre compound Bristol.

E. Ballois.

REVUE INDUSTRIELLE ET SCIENTIFIQUE

THÉORIES ET GÉNÉRALITÉS

Observations spectroscopiques sur la réflexion et la dispersion des rayons-canal. — **W. Hermann et S. Kinoshita.** — *Physikalische Zeitschrift*, 15 août 1906.

L'effet de doublet découvert par Stark sur les rayons-canal montre que ceux-ci sont formés d'atomions positivement chargés et donne sur eux, à plusieurs points de vue, des indications exactes. Avec l'aide de cet effet, on peut déterminer quelle lumière émettent les ions des rayons-canal, à quels éléments ils appartiennent, et quelle est leur valence, c'est-à-dire combien d'électrons négatifs l'atome individuel perd lors de l'ionisation. La composante de vitesse des ions dans la direction de l'observation est rendue presque directement perceptible par l'effet de doublet. On possède donc un moyen pour étudier les phénomènes du mouvement sur les atomions.

Les auteurs ont fait une étude sur des ions hydrogène monovalents sous forme de rayons-canal dispersés pendant leur passage dans le tube et réfléchis à l'extrémité du tube à vide sur la paroi en verre de celui-ci. La vitesse de ces ions est, au point de vue de l'ordre de grandeur, intermédiaire entre les vitesses moyennes que possèdent les molécules d'un gaz d'après sa température absolue et celle des rayons α qui, d'après les expériences de Bragg et Kleeman, présentent, lors de leurs chocs avec des molécules, la propriété particulière de traverser celles-ci au lieu d'être réfléchies, lorsque leur vitesse n'est pas inférieure à une limite déterminée.

Les auteurs ont relevé un grand nombre de spectrogrammes obtenus soit avec un spectro-

graphe à prisme, soit avec une petite grille concave. Les tubes à rayons-canal employés étaient remplis d'hydrogène, d'azote ou d'acide carbonique : jusqu'à présent les auteurs n'ont pu observer de réflexion et de dispersion que sur les rayons-canal de l'hydrogène.

Parmi les raies de la série connue $H_\alpha H_\beta$... de l'ion hydrogène monovalent, H_β, H_γ et H_δ présentent seules sur les plaques le phénomène étudié : les autres ont une intensité photographique trop faible. Dans les spectrophotogrammes obtenus avec l'appareil à prisme, la raie H est aussi peu distincte, car elle tombe en dehors de la région que le spectrographe enregistre nettement, par suite du montage adopté, et elle présente, dans ces conditions, un élargissement apparent vers le rouge.

Ce qui suit se rapporte à des spectrogrammes obtenus dans des conditions assez semblables. Le tube était rempli d'hydrogène, d'azote ou d'acide carbonique ; les rayons-canal tombaient sur la fente du spectrographe et atteignaient l'extrémité du tube : l'espace des rayons-canal avait 5 à 8 centimètres de longueur. Les raies étudiées présentent alors l'aspect qu'indiquent les figures 1, 2 et 3 (relatives à l'hydrogène, l'azote

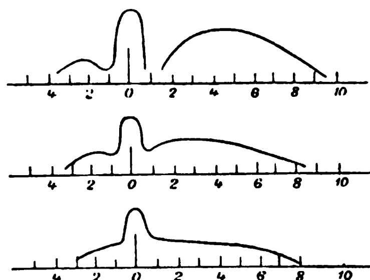


Fig. 1, 2 et 3.

et l'acide carbonique). Ces figures donnent les courbes d'intensités pour H pour une différence de potentiel aux bornes de 4 000 volts. Les ordonnées sont proportionnelles au noircissement photographique en unités arbitraires ; les abscisses sont proportionnelles à l'écart de la longueur d'onde $\Delta\lambda$ par rapport au milieu de la raie de repère (4340,7) en unités Angström. La vitesse du corps qui émet de la lumière dans la direction du collimateur pouvant être calculée d'après l'effet de doublet au moyen de la formule

$$v = (\Delta\lambda/\lambda) \times \text{vitesse de la lumière},$$

un déplacement d'une unité Angström correspond, dans le cas dont il s'agit, à 69 kilomètres par seconde environ.

Si les rayons de l'hydrogène se déplacent dans l'hydrogène, les raies en question présentent à peu près l'image suivante : au milieu est une « raie de repos » provenant des ions qui n'ont pas de vitesse sensible. Vers le violet se produit un minimum d'intensité, puis une bande étalée ; cette partie est due aux rayons-canal qui tombent sur la fente. Vers le rouge, on trouve une image de la partie précédente à une plus petite échelle : après la ligne de repos, il existe un minimum d'intensité moins long et moins profond que celui trouvé de l'autre côté, puis une bande possédant seulement une faible largeur et une faible intensité par rapport à celle de l'autre côté.

L'effet produit vers le rouge provient sans doute de la réflexion des rayons-canal à l'extrémité du tube. La réflexion sur des molécules dans l'espace occupé par le gaz ne peut en produire qu'une faible partie. Dans deux expériences, les rayons-canal faisaient un angle de 135° avec le collimateur : la fente était placée directement derrière la cathode. et l'espace des rayons cathodiques était assez long, de sorte que les rayons réfléchis à l'extrémité postérieure n'intervenaient plus pour l'enregistrement. L'effet des rayons sortant de la fente avec cette inclinaison se produisait alors du côté du rouge par rapport à la raie de repos. Du côté du violet, aucun effet de doublet n'était visible ; il ne se produit donc pas de réflexion sensible des rayons de l'hydrogène dans l'hydrogène.

On peut d'ailleurs, même à l'œil nu, constater une réflexion diffuse sur la paroi de verre par l'observation suivante faite sur des tubes remplis d'hydrogène. Les différents faisceaux de rayons sortant des trous, très rapprochés les uns des autres, du disque formant la cathode, sont parallèles les uns aux autres pour une faible pression de gaz et sont nettement séparés les uns des autres par des espaces très faiblement lumineux. Quand l'intensité de courant diminue, les faisceaux extérieurs de rayons disparaissent, et il ne reste plus que les faisceaux voisins de l'axe du tube. A l'extrémité de celui-ci cesse, pour l'œil, la séparation des différents faisceaux ; l'émission lumineuse devient plus intense et plus rouge, et la région lumineuse s'étend de l'axe vers les côtés. Sur le spectrogramme, l'effet de

réflexion est très faible en comparaison de l'effet des rayons incidents, parce qu'une faible partie seulement des rayons tombe dans le champ de vision du spectrographe.

Si l'on compare les différentes raies d'une série, l'intensité de l'effet de réflexion croît plus rapidement avec la longueur d'ondes que cela n'a lieu pour la raie de repos et pour les rayons incidents. La lumière des rayons réfléchis doit donc paraître plus rouge à l'œil.

Parmi les rayons d'ions positifs existant à la partie antérieure de la cathode, une partie d'entre eux traverse les trous sous forme de rayons-canal ; l'autre partie tombe sur les parties pleines de l'électrode. Ceux-ci doivent, d'après Stark, subir une réflexion sur la partie antérieure du disque. Les rayons ainsi réfléchis seraient des rayons d'ions positifs, dont la vitesse décroît rapidement, car la force électrique les pousse vers la partie postérieure de la cathode. Ces rayons devraient présenter la teinte des rayons-canal et, tant qu'ils possèdent encore une bonne partie de leur vitesse, présenter la même sensibilité que ceux-ci vis-à-vis des forces magnétiques et électrostatiques. En fait, Goldstein a constaté l'existence de rayons émanant de la partie antérieure du disque cathodique et très semblables aux rayons-canal : ces rayons sont roses dans l'hydrogène et jaune d'or dans l'air, comme les rayons-canal. Par rapport aux champs magnétique et électrique, ils ne sont pas plus sensibles que ceux-ci. Goldstein pense que les rayons ainsi observés par lui peuvent être engendrés par les chocs des rayons positifs sur la cathode.

Revenant aux spectrogrammes esquissés par les figures 1, 2 et 3, les auteurs indiquent que la nature du gaz contenu dans le tube modifie beaucoup les rayons-canal et par suite aussi l'apparence des raies émises par ceux-ci.

La figure obtenue pour les raies des rayons de l'hydrogène dans l'hydrogène présente des minima et des maxima d'intensité très nets. Quand le tube a été rempli d'azote, ces contrastes s'atténuent, et, pour l'acide carbonique, ils ne sont plus marqués. En outre on retrouve le même ordre pour la plus grande valeur de l'écart que possède l'effet de doublet par rapport à la raie de repos. Ce phénomène est explicable par la dispersion des rayons-canal à l'intérieur du gaz. L'influence de cette dispersion doit être d'autant plus grande que la densité du gaz est plus grande, c'est-à-dire doit être beaucoup plus forte dans l'azote et dans l'acide carbonique que dans l'hydrogène. Pour un vide très poussé, elle doit disparaître. En fait, pour un vide poussé, l'aspect des raies est indépendant de la nature du gaz de remplissage du tube.

Si les rayons-canal acquièrent, dans leurs chocs à l'intérieur du gaz, de grandes vitesses latérales ou même inverses, on pourrait le voir au moyen de spectrogrammes pour l'enregistrement desquels le collimateur du spectrographe aurait une position correspondante. De tels spectrogrammes exigent une très longue durée d'exposition.

B. L.

Sur la région d'ionisation des rayons α de l'actinium. — **O. Hahn.** — *Physikalische Zeitschrift*, 15 août 1906.

L'auteur a indiqué, dans une précédente étude [1] les méthodes employées pour l'étude de la région d'ionisation dans l'air des différents rayons α du thorium. Il a fait une étude analogue sur la région d'ionisation des rayons et des différents produits de l'actinium et en indique les résultats. Les expériences ont porté sur les particules α des produits suivants : dépôt actif ; actinium X ; radioactinium ; émanation de l'actinium.

Les préparations employées étaient d'une part de l'actinium (émanium) de Giesel, d'activité 300 environ, et d'autre part de l'actinium de Debierne, d'activité 700 environ. Le dispositif expérimental était le même que pour le thorium et analogue à celui employé antérieurement par Bragg et Kleemann dans leurs recherches sur la région d'ionisation des rayons α des différents produits du radium.

Comme l'a indiqué l'auteur dans sa précédente publication, la difficulté principale rencontrée dans l'étude de l'ionisation des produits du thorium provenait du fort pouvoir d'émanation que présentent toutes les préparations contenant du thorium X. Pour éviter autant que possible toutes les perturbations provenant de l'action et de l'émanation, on plaçait la préparation active dans un auget dans lequel passait un courant d'air constant destiné à entraîner l'émanation. Pour une distance un peu importante de la préparation active de la chambre de mesure, cette

[1] *Eclairage Electrique*, tome XLVIII, 11 août 1906, p. 223.

disposition a donné des résultats satisfaisants : pour de faibles distances au contraire, on ne pouvait éviter les perturbations. Dans quelques cas, la préparation active était recouverte d'une mince feuille de mica empêchant l'émanation de gagner l'air environnant.

Avec l'actinium, les perturbations produites par l'émanation sont encore plus considérables qu'avec le radiothorium, quoique l'activité des préparations employées fut relativement assez faible. Cela provient de la rapide décomposition de l'émanation de l'actinium (durée de demi-décomposition 3,7 secondes) qui est effectuée en majeure partie avant que le courant d'air, même très violent, ait pu entraîner l'émanation. L'action des rayons α est alors beaucoup plus intense dans ce cas, et les perturbations dues à l'émanation se produisent toujours. La seule façon de tourner cette difficulté consiste à enfermer hermétiquement, au moyen d'une feuille de mica, la substance qui produit de l'émanation, et de déterminer ensuite par une expérience préliminaire l'épaisseur d'air équivalant à la feuille de mica.

Dépôt actif de l'actinium. — Il était particulièrement intéressant de connaître la courbe d'ionisation des particules α du dépôt actif de l'actinium, car les expériences faites sur le dépôt du thorium ont montré que celui-ci contient deux produits de rayons α bien caractérisés. L'étude du dépôt actif de l'actinium ne présente pas de difficulté, car on peut l'obtenir à l'état pur et en couches très minces.

Le dépôt actif fut rassemblé sur un fil de cuivre mince de 1 centimètre de longueur environ, en exposant le fil comme corps négativement chargé à l'émanation d'une quantité aussi importante que possible d'actinium. Les mesures de l'ionisation furent faites environ 10 à 15 minutes après cessation de la durée d'exposition. Au bout de ce temps, la diminution d'activité du dépôt actif suit une loi à peu près exponentielle avec une période de 36 minutes. Les intensités de courant observées aux différents temps pendant la mesure devaient subir, par suite, une correction. Celle-ci était faite facilement par extrapolation de la courbe connue de décroissance du dépôt actif.

L'activité du fil n'était déjà pas très forte au début de l'expérience et, comme elle diminue rapidement pendant l'expérience, on ne pouvait tracer d'une façon suffisamment exacte avec un fil que la moitié environ de la courbe d'ionisation. Pour achever le tracé de la courbe, on employait un second fil. Les deux moitiés de courbe étaient juxtaposées aux points correspondants et donnaient alors, avec une grande exactitude, la courbe totale d'ionisation. La forme de cette courbe montre nettement qu'il n'existe qu'un seul produit de rayons α. L'ionisation par les rayons α commence pour une distance de $5^{cm},5$, croît très rapidement, atteint un maximum pour $3^{cm},6$ et diminue ensuite peu à peu quand la distance de la source de radiation diminue. La courbe fut tracée jusque pour une distance de 1 centimètre entre la chambre de mesure et le fil actif : il serait bien invraisemblable qu'un second groupe de rayons α se manifestât pour une distance inférieure à 1 centimètre. On peut donc en conclure que le dépôt actif de l'actinium émet une seule sorte de rayons α qui ont le pouvoir d'ioniser l'air jusqu'à une distance de $5^{cm},5$. Le dépôt actif du thorium émettant deux sortes distinctes de particules α, on voit qu'il existe une différence intéressante entre la nature de la décomposition de l'atome de thorium et celle de l'atome d'actinium.

Actinium X. — La détermination exacte de la région d'ionisation des rayons α émis par l'actinium X présente de grandes difficultés à cause de la production d'émanation. L'actinium X était préparé d'après la méthode décrite dans l'étude précédente pour la séparation du thorium X. Quand on précipite avec de l'ammoniaque une solution d'actinium, la séparation ne se fait pas immédiatement d'une façon complète, et il faut un temps assez long pour l'obtenir. Dans les expériences de l'auteur, on employait une très mince couche d'actinium X vaporisé sur un couvercle de platine que l'on chauffait pendant peu de temps pour faire dégager l'ammoniaque. Malgré toutes les précautions, il est difficile de ne pas avoir d'émanation et d'actinium B. Mais les particules α de l'actinium X ayant, comme on le verra plus loin, une région d'ionisation plus grande que celle de l'actinium B et de l'émanation, la présence de ces deux derniers produits ne trouble pas la détermination de la distance maxima d'ionisation des particules α de l'actinium X.

Pour obtenir des résultats exacts, il est nécessaire d'enfermer hermétiquement l'actinium X au moyen d'une feuille de mica pour éviter l'action de l'émanation. L'ionisation produite par les

rayons α commence pour environ $6^{cm},55$ d'air : ce chiffre doit être exact à 1 millimètre près environ, car il est la moyenne d'un grand nombre d'expériences.

Radioactinium. — La place de ce produit dans la série de désintégration est située entre l'actinium et l'actinium X. Le radioactinium émet des rayons α et est à demi décomposé en l'espace de 20 jours environ.

Le radioactinium employé fut préparé de différentes façons : la méthode la plus commode est celle qui correspond à la séparation du radioactinium de ses produits. Pour supprimer complètement l'actinium X, on précipitait la solution cinq fois successivement avec de l'ammoniaque.

La courbe obtenue pour le radioactinium montre que le pouvoir de pénétration maximum des rayons α est de $4^{cm},8$, valeur exacte à 1/2 millimètre près.

Il n'y a qu'une sorte de rayons α. L'activité croît d'abord avec le temps, par suite de la formation de l'actinium X et des produits successifs. Des courbes relevées 4 et 21 jours après la préparation du radioactinium montrent que l'ionisation commence déjà pour une distance de $6^{cm},6$ environ. Cela provient des particules α de l'actinium X nouvellement formé, dont les rayons α ont un pouvoir de pénétration de $6^{cm},55$ comme on l'a vu plus haut.

Au bout de 4 jours, l'équilibre entre le radioactinium et l'actinium X n'est pas encore atteint : au bout de 20 jours, il est atteint et l'activité maxima est obtenue. Ensuite l'activité du radioactinium diminue, puis suit une loi exponentielle avec une période de 20 jours environ. Quand de l'actinium lui-même existe en quantité normale, l'activité ne diminue pas, mais conserve sa valeur maxima. S'il existe un peu d'actinium, l'activité diminue un peu, mais atteint au bout de peu de temps un état d'équilibre qui ne dépend que de la quantité d'actinium présent. Les courbes montrent qu'il n'existait pas d'actinium dans le radioactinium étudié par l'auteur.

Émanation de l'actinium. — La méthode employée fut la même que pour l'émanation du thorium avec un écran à scintillation couvert de sulfure de zinc. On trouva ainsi, pour la région d'ionisation des particules α, le chiffre de $5^{cm},8$. Le tableau I résume les pouvoirs de pénétration des différents produits de l'actinium. Les valeurs correspondantes relatives aux produits du thorium sont indiquées ainsi pour permettre la comparaison, ainsi que les valeurs trouvées par Bragg et Kleemann pour les produits du radium.

TABLEAU I

PRODUIT	DISTANCE d'ionisation des particules α dans l'air à pression et température ambiantes.	PRODUIT	DISTANCE d'ionisation des particules α à la pression et températures ambiantes.	PRODUIT	DISTANCE d'ionisation des particules α à la pression et températures ambiantes.
Radioactinium.	$4^{cm},8$	Radiothorium.	$3^{cm},9$	Radium.	$3^{cm},50$
				Émanation.	4 3
Actinium X.	6 55	Thorium X.	5 7	Radium A.	4 83
Émanation.	5 8	Émanation.	5 5	Radium C.	7 06
Actinium B.	5 50	Thorium B.	5 0	Radium F.	3 86
		Thorium C.	8 6		

On voit, d'après les chiffres de ce tableau, que la distance d'ionisation des particules α des produits du thorium varie dans de plus grandes limites que celle relative aux produits du radium, et celle-ci dans de plus grandes limites que celle relative aux produits de l'actinium. Par exemple, la plus grande différence dans le pouvoir de pénétration des produits α du thorium est de $4^{cm},7$; celle relative aux produits du radium est de $3^{cm},56$, et celle relative aux produits de l'actinium est de $1^{cm},75$.

On trouve une très intéressante relation en comparant la distance d'ionisation des particules α du thorium et de l'actinium. Dans le tableau II, on a classé les différents produits d'après la valeur du pouvoir de pénétration de leurs particules α.

TABLEAU II

DISTANCE d'ionisation	PRODUIT	DISTANCE d'ionisation	PRODUIT
4,8	Radioactinium.	3,9	Radiothorium.
5,50	Actinium B.	5,0	Thorium B.
5,8	Émanation de l'actinium.	5,5	Émanation du thorium.
6,55	Actinium X.	5,7	Thorium X.
		8,6	Thorium C.

On voit que chacun des produits correspon-

dants de l'actinium ou du thorium occupe la même place dans la classification. La seule différence est que l'on ne trouve pas, dans l'actinium, de corps correspondant au thorium C.

La similitude dans la nature des produits de décomposition du thorium et de l'actinium et la concordance indiquée par le tableau II laissent supposer qu'il y a une étroite relation dans la nature de la décomposition de l'atome de ces deux corps.

B. L.

GÉNÉRATION ET TRANSFORMATION

***Régulateur de turbines hydrauliques.* — Pirkl.** — *Elektrotechnik und Maschinenbau*, 5 août 1906.

Cet appareil repose sur le principe de l'inertie et sur le principe de l'interférence combinés. On compare la vitesse de rotation variable d'un moteur principal avec la vitesse de rotation à peu près invariable d'un moteur auxiliaire, les jonctions cinématiques étant telles qu'une différence des deux vitesses produise un mouvement correspondant de l'organe de réglage du moteur principal. Cette idée fondamentale a déjà donné lieu à la construction du régulateur à interférence des frères Laukner, mais, dans cet appareil, il manque une masse en mouvement possédant une inertie suffisante pour que l'intervention de l'organe de réglage ne réagisse pas sur le moteur auxiliaire. Cette masse en mouvement doit fournir, sans variation de vitesse appréciable, l'énergie nécessaire pour la manœuvre de l'organe de réglage. Le moteur auxiliaire n'a alors rien d'autre à faire que de couvrir la résistance de frottement de cette masse en mouvement calée sur son arbre et de maintenir sa vitesse de rotation constante. Ici, le principe d'inertie est utilisé avec le principe d'interférence et l'avantage qui en résulte est évident, si l'on songe que l'on réalise ainsi un régulateur qui, sans servo-moteur, peut exercer des efforts importants tout en ayant une très grande sensibilité.

L'appareil reposant sur ce principe et employé pour le réglage de turbines Francis est représenté par les figures 1 et 2. Une poulie à courroie A enfilée à frottement doux avec un palier en bronze sur l'arbre *bb* est entraînée directement par le moteur principal à régler et communique à la roue dentée Z, boulonnée sur elle, une certaine vitesse périphérique *v*. Une seconde roue dentée Z_1, tournant à une vitesse périphérique uniforme est placée en face de la première et fait corps avec l'arbre *bb* : elle reçoit son

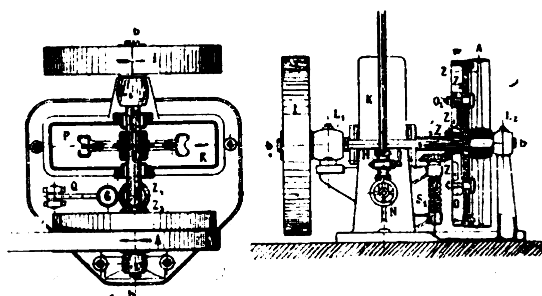


Fig. 1 et 2.

mouvement d'une petite roue Pelton P, clavetée sur l'arbre *bb*. Un volant *i* est également calé sur l'arbre *bb*, qui tourne dans les paliers L_1 L_2. La roue Pelton représente le moteur auxiliaire tournant à une vitesse constante, car le jet d'eau qui agit sur elle possède toujours la même vitesse, grâce à l'emploi d'un réservoir muni d'un robinet à flotteur qui maintient le niveau toujours constant. Un petit volant à main, commandant une aiguille de réglage dans la tuyère de la roue Pelton, permet de modifier la vitesse de rotation du régulateur et, par suite, de toute l'installation.

Entre les roues dentées Z et Z_1 du régulateur sont placés deux pignons satellites Z_2 qui, lorsque les vitesses périphériques des deux roues dentées sont égales, restent immobiles dans l'espace et tournent seulement autour de leurs axes O_2. Quand les vitesses périphériques de Z et Z_1 ne sont pas égales, les pignons satellites sont entraînés dans le sens de la plus grande vitesse et font tourner le disque O sur lequel ils sont fixés : cette rotation est transmise par les engrenages Z_3 et Z_4 à la vis S_1 dont la rotation détermine le déplacement du bras Q agissant sur le levier de réglage.

Mais, dans la plupart des turbines hydrauliques et, en particulier, dans les turbines Francis, l'eau exerce, lors de la fermeture, une réaction sur le régulateur, réaction qui tend à entraîner le disque O par l'intermédiaire du levier Q et de la vis S_1. Pour éviter cet inconvénient, on compense cette force de réaction par une force antagoniste composée en grande partie (70 %) par un poids lourd et en faible partie (30 %) par les frottements existant dans tout le méca-

nisme de réglage, la majeure partie de ces frottements provenant de la vis S_1 dont le pas est choisi convenablement dans ce but.

Pour éviter que la turbine ne puisse s'emballer, on a prévu entre le disque O et un cylindre relié à la roue dentée Z deux freins en fonte actionnés par des ressorts et mis en action quand la vitesse dépasse une valeur déterminée.

B. L.

Sur la résistance de passage des balais de dynamos. — **F. Arnold.** — *Elektrotechnik und Maschinenbau.* 29 juillet 1906.

L'auteur décrit des expériences faites pour déterminer la résistance de passage présentée par différents types de balais de dynamos. Quelques-uns des résultats de ces expériences ont déjà été résumés par S. Salto (1).

Le passage du courant du collecteur au balai entraîne toujours la production d'une différence de potentiel entre les points de contact. Cette chute de tension de passage ΔP représentant, particulièrement dans les types de balais actuellement employés, une partie importante des différences de potentiel qui interviennent pendant la commutation dans le circuit court-circuité, et les pertes de passage W_u au collecteur pouvant atteindre des valeurs relativement grandes, il était important de faire, sur les phénomènes en jeu, des expériences exactes.

Les phénomènes physiques qui se produisent sur le balai présentent de l'analogie avec l'action des cohéreurs : il est possible, par suite, d'obtenir de ce côté quelques explications des phénomènes intéressants que l'on constate.

Les expériences techniques faites par l'auteur se rapportent à quatre points de vue différents :

a) Essais comparatifs de l'emploi pratique de différents types de balais ;

b) Expériences scientifiques pour déterminer la relation entre la chute de potentiel de passage et la densité de courant variable ainsi que la température de la couche de passage ;

c) Expériences purement pratiques pour obtenir des données sur les densités de courant admissibles et maxima des balais en fonctionnement et sur la pression la plus favorable ;

d) Expériences sur les pertes totales aux balais, pour la détermination des dimensions à donner aux collecteurs et aux bagues.

Suivant le but à atteindre, on fait frotter les balais sur une bague plate ou sur un collecteur : la première des expériences permet d'éviter autant que possible les phénomènes accessoires gênants : la seconde permet de se placer dans des conditions aussi voisines que possible des conditions normales de fonctionnement des machines à collecteur. Les deux expériences peuvent être combinées, par l'emploi de bagues rainurées.

Pour représenter les résultats, le meilleur moyen est de porter la différence de potentiel mesurée ΔP d'un balai n en fonction d'une grandeur prise comme variable indépendante : on obtient ainsi une sorte de caractéristique du type de balais employé. On peut aussi former le quotient :

$$R_k = \frac{W_u}{J^2} = \frac{\Delta P}{J},$$

en définissant une résistance de passage R_k comme la cause des pertes de passage : il ne faut toutefois pas oublier que R_k n'est pas une résistance ohmique propre, mais dépend beaucoup de la densité de courant.

Les grandeurs ΔP et R_k sont influencées par différentes causes : la constitution du balai, du collecteur et de la bague, la densité de courant s_u, le sens du courant, la température de la surface du passage, la constitution chimique des surfaces de contact, la pression d'application g, la vitesse périphérique v, la nature du courant (courant continu, alternatif ou ondulé). Il y a encore la vibration des porte-balais et de la machine, le mode de construction du collecteur et de la machine, et la constitution des paliers.

Le dispositif expérimental employé à l'institut électrotechnique de Carlsruhe pour ces recherches a été décrit par S. Salto. Les deux balais d'essai semblables frottaient sur une bague en laiton entraînée par un moteur shunt dont la vitesse pouvait varier dans de très grandes limites. L'arbre relié électriquement à la bague aboutit à un contact de mercure dont la différence de potentiel peut être facilement mesurée par rapport à l'un des deux balais. Pour des mesures exactes, il faut éviter les vibrations et n'employer qu'un balai, afin d'éviter les inégalités de pression. Ce dispositif se prête bien aux expériences comparatives sur des balais de différentes sortes

(1) *L'Éclairage Électrique*, tome XCVIII, 17 juillet 1905, page 68.

ainsi qu'à la détermination de la relation entre la chute de tension de passage, la pression d'application, la vitesse périphérique et la température de la surface.

Mais les conditions dans lesquelles se trouve un balai pendant la commutation ne correspondent pas du tout à une charge avec densité de courant constante, car, par suite des courants de court-circuit, ΔP varie non seulement dans l'espace mais aussi dans le temps pour un seul et même point de la surface de contact. Par contre le potentiel du balai lui-même est à peu près constant sur toute la surface de contact : sur un balai homogène, on peut à peine, avec un millivoltmètre, déceler une différence de potentiel entre les bords opposés : avec des balais stratifiés, cette différence de potentiel peut parfois atteindre quelques centièmes de volts.

Pour avoir une idée exacte des phénomènes de commutation; il est important d'étudier le fonctionnement d'un balai pour une densité de courant rapidement variable. Le dispositif employé était le suivant. Les deux balais frottant sur une bague en laiton étaient traversés par un courant alternatif de fréquence constante et d'intensité efficace constante, et on déterminait avec un galvanomètre les valeurs de ΔP_x et de i_x. L'étalonnage de cet appareil avec du courant continu dans les mêmes conditions donnait les valeurs absolues ΔP et i. Le passage du courant était déterminé par le jeu d'un organe de contact actionné par une came que portait un disque calé sur l'arbre de l'appareil d'essais.

Influence du sens de passage du courant. — Si l'on relève la caractéristique $\Delta P = f(s_u)$ pour un sens de passage du courant, et si l'on inverse la polarité du balai, en attendant après chaque modification de la densité de courant que l'état stationnaire soit atteint, on trouve deux courbes différentes. La chute de potentiel de passage dépend donc de la polarité du balai. Pour des balais homogènes en charbon, la chute de tension dans le sens du courant métal-charbon est plus grande qu'en sens inverse, c'est-à-dire est plus grande pour les balais positifs que pour les balais négatifs. Ce fait est vérifié par l'observation, fréquemment faite en pratique, que les balais d'une polarité commencent à cracher avant les autres quand on charge progressivement la machine. Pour les balais mixtes contenant du charbon et du métal, la polarité n'a pas le même signe pour toutes les sortes de balais, pour un sens de passage donné du courant.

On ne peut pas dire actuellement si la cause de la polarité est due à une tension d'ionisation variable pour différentes substances aux surfaces de contact, ou si le phénomène du transport de l'électricité dans la couche de passage est de nature électrolytique, les balais et le collecteur servant d'anode et de cathode et l'humidité de l'air d'électrolyte, ou bien si d'autres phénomènes encore inconnus interviennent.

Influence de la constitution chimique de la surface de passage. — La chute de tension de passage dépend de la constitution chimique des surfaces, suivant que la surface de la bague de contact était fraîchement polie ou bien oxydée, humide ou sèche, huilée ou non. Si l'on polit la bague de contact et si l'on envoie du courant dans le balai, la chute de tension est d'abord relativement faible, puis la bague se recouvre peu à peu d'une couche brune d'oxyde et la différence de potentiel de passage s'élève jusqu'à atteindre une valeur constante. On n'obtient par suite pas les mêmes résultats en plaçant les deux balais sur la même bague de contact ou en plaçant chacun d'eux sur une bague distincte. Quand les bagues sont distinctes, on observe au bout de quelque temps une coloration brun foncé sur la bague où le courant va du métal au charbon et une coloration brun clair sur l'autre bague. Le phénomène se répète si l'on polit la bague et s'inverse si on inverse le sens de passage du courant : il est plus marqué avec les balais en charbon dur qu'avec des balais en charbon tendre, parce que ces derniers graissent le collecteur. Peut être ce phénomène est-il explicable par l'électrolyse de la couche d'humidité existant sur la surface de la bague. L'oxygène va alors à l'anode, de sorte que la bague formant anode s'oxyde plus fortement. Les différences de tension de passage quand on emploie une ou deux bagues ne sont pas les mêmes pour les différentes sortes de balais.

Influence de la température. — La température de la surface de passage joue un rôle prépondérant qui, en général, croît avec la densité de courant. La tension de passage ou la résistance de passage diminue quand la température augmente. On peut le montrer facilement en chauffant avec une flamme la bague ou le collecteur. Ce fait est en concordance avec la diminution

présentée par la tension de passage quand on augmente la pression d'application du balai, c'est-à-dire le travail de frottement sur la bague.

La chute de la tension de passage avec l'augmentation de température est facilement compréhensible, car on a affaire généralement à des corps à coefficient de température négatif, charbon-oxyde métallique, et parce que les phénomènes électrolytiques sont activés par une augmentation de température. En outre le charbon est « plus mou » pour les fortes densités de courant, c'est-à-dire que les particules de charbon glissent plus facilement, ce qui améliore le contact entre le balai et le collecteur. De ce qui précède, il résulte que, par le tracé d'une courbe caractéristique d'un balai, il est absolument nécessaire d'attendre après chaque modification, jusqu'à ce qu'un état permanent se soit établi.

Relation entre la tension de passage et la densité de courant. — Les courbes $\Delta P = f(s_u)$ présentent des formes différentes suivant la nature du balai employé. Pour les balais en cuivre, on obtient une courbe presque droite. Quant aux balais en charbon, ils présentent un fonctionnement très variable, de sorte que, pour des conditions d'expérience en apparence semblables, on obtient des valeurs sensiblement différentes pour ΔP. Pour les balais durs, la courbe ΔP est beaucoup au-dessus de celle relative à des balais tendres, quand la vitesse périphérique, la pression d'application, et la densité du courant sont les mêmes. Pour les balais à adjonction métallique récemment employés, la forme de la courbe $\Delta P f(s_u)$ est différente.

Balais en charbon pour de très fortes densités de courant. — Pour ces expériences on prit un balai de la société Le Carbone, variété X, et on le tailla suivant la forme représentée par la figure 1. Ce balai fut placé sur une bague dont la vitesse périphérique d'environ 5m,5 par seconde, puis chargé progressivement avec du courant continu. Pour une densité de 465 ampères par centimètre carré le charbon atteignit le rouge sombre en son milieu : aux deux extrémités, il restait noir par suite de la facile dissipation de la chaleur. Pour une densité de courant de 500 ampères par centimètre carré, le charbon devint blanc incandescent en une heure, et brûlé en peu d'heures comme l'indique la figure 1, mais la surface frottante resta extrêmement sombre et on ne voyait aucune étincelle. L'expérience montre nettement que l'étincelle des balais pendant la commutation ne peut être occasionnée uniquement par une trop forte densité de courant.

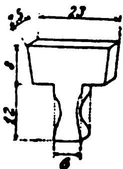


Fig. 1.

Relation entre la tension de passage et la pression d'application. — Quand la pression augmente, la tension de passage diminue rapidement d'abord, puis plus lentement. Les courbes relevées sont importantes, ainsi que la caractéristique, pour juger de la valeur d'un balai. En effet, quand la pression augmente, les pertes par frottement augmentent, tandis que les pertes de passage diminuent : il existe donc une pression déterminée qui est la plus avantageuse. La même pression n'est d'ailleurs pas la meilleure pour la commutation, c'est, comme l'on sait, une faible tension de passage qui rend la commutation plus mauvaise. Dans beaucoup de machines à courant continu à basse tension, on observe que l'autoexcitation dépend beaucoup de l'état du collecteur et de la pression des balais.

Influence de la vibration des balais. — Si un collecteur a du faux rond ou est excentré, ou si le porte-balais est mal amorti, il se produit des vibrations et la tension de passage croît. On peut, dans ce cas, remarquer qu'il existe une vitesse critique pour laquelle la formation d'étincelles atteint son maximum. C'est la vitesse pour laquelle la résonance se produit entre les chocs et les vibrations propres des porte-balais. Le poids, la suspension, la surface et la construction des porte-balais, ainsi que le nombre de lames du collecteur, présentent donc une très grande importance, mais ne peuvent pas être prédéterminés facilement.

Fonctionnement des balais pour des densités de courant rapidement variables. — Les expériences furent faites sur un balai de la Société Le Carbone type Z. Les courbes de la tension instantanée ΔP_x en fonction de la densité de courant instantanée s_{ux} montrent que, entre 40 et 186 périodes, on ne peut faire aucune différence dans l'allure de ΔP. Il existe, ici aussi, une polarité déterminée. Il n'existe pas de décalage entre ΔP_x et S_{ux} ou entre e et i. Les courbes ΔP_u montent plus rapidement pour du courant alternatif que pour du courant continu, avec de fortes densités de courant.

Pour les calculs analytiques, on peut rempla-

cer approximativement les courbes $\Delta P_x = f(s_{ux})$ par des droites.

$$\Delta P_x = e_u + s_u R_w,$$

e_u étant une constante, et R_w dépendant de $s_{u\,eff}$. Généralement, on peut poser $e_u = o$, c'est-à-dire que la droite passe par l'origine. On a alors

$$\Delta P_x = R_w s_{ux}$$

ou $$R_w = R_k$$

pour $$s_{u\,eff} = s_u \text{ (courant continu)}.$$

B. L.

Sur les harmoniques supérieurs à phase alternante. — **B. Strasser et J. Zenneck.** — *Drudes Annalen*, Juillet 1906.

Quand on veut analyser l'onde d'un alternateur monophasé ou triphasé, on peut employer la méthode suivante. On fait agir l'onde sur un circuit comprenant un condensateur, une self induction et un voltmètre ou un ampèremètre, et on modifie les constantes de ce circuit jusqu'à ce que, par suite de la résonance, la déviation de l'appareil de mesure indique un maximum. Si la fréquence propre d'oscillations du circuit est n, on sait qu'il y a, dans le courant alternatif, une oscillation de fréquence n. Si, au lieu d'un appareil de mesure, on emploie un tube de Braun et un miroir tournant, ou un dispositif équivalent, on peut observer l'allure que présente, dans le temps, l'oscillation du circuit résonant.

Les phénomènes que l'on s'attend à observer sont les suivants. Les oscillations propres du système résonant ne sont excitées qu'au moment de la fermeture du courant et disparaissent rapidement par suite de leur amortissement. Quand l'état est devenu stationnaire, les oscillations forcées peuvent seules être observées. Dès qu'on approche de la fréquence n de l'oscillation fondamentale ou d'un harmonique supérieur, on doit obtenir dans le miroir tournant une oscillation sinusoïdale régulière d'amplitude constante, qui atteint un maximum pour la fréquence n.

C'est bien ce qui se produit pour une classe d'harmoniques supérieurs, les *harmoniques normaux*, dont la relation avec le temps t pendant toute la période de l'onde fondamentale peut être exprimée par une équation de la forme :

$$A = A_0 \sin \pi . K n t,$$

n étant la fréquence fondamentale et K un nombre entier.

Mais dans une *seconde classe d'harmoniques supérieurs*, on trouve tout autre chose. Si le circuit résonant est en résonance avec un tel harmonique, on voit dans le miroir tournant l'image de la figure 1 : s'il est désaccordé d'une certaine

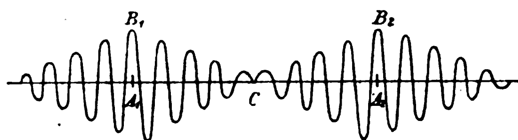
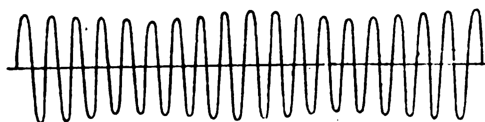


Fig. 1.

quantité par rapport à l'harmonique, on observe l'image de la figure 2. La valeur maxima de l'amplitude peut, dans ce dernier cas, être plus


Fig. 2.

grande que dans le précédent (fig. 1). Les images obtenues pour d'autres fréquences du circuit résonant présentent des formes intermédiaires entre celles des figures 1 et 2.

L'explication de ce phénomène doit être cherchée dans le fait que, dans les oscillations harmoniques de la deuxième classe, il se produit un changement de phase de 180° après chaque demi-période de l'onde fondamentale. Lors de la résonance, quand l'état déterminé est atteint, l'alternance de phase se produit à l'instant représenté par l'abscisse A_1 (fig. 1), l'oscillation existant dans le circuit résonant agit alors à l'opposé de la force électromotrice et réduit peu à peu à zéro l'amplitude du courant. Cela se produit au temps C. Dans le reste de la demi-période, le phénomène est le même que lors de la fermeture du courant : outre l'oscillation forcée, il se produit aussi une oscillation propre. Il s'ensuit que l'amplitude de l'oscillation résultante croît peu à peu jusqu'à la valeur A_2B_2. Il se produit alors à nouveau une alternance de phase de la force électromotrice, et le phénomène se reproduit.

Si le système résonant est un peu désaccordé, les oscillations propres sont encore excitées par suite de l'alternance de phase de la f. é. m. Il existe par suite dans le système résonant deux

oscillations : l'oscillation propre de fréquence n, et l'oscillation forcée de fréquence n de l'harmonique. L'oscillation résultante peut être considérée comme étant de fréquence n, avec la particularité que la phase varie peu à peu, puisque l'on a :

$$A \sin \pi n t + A_1 \sin(\pi n_2 t - \alpha) = A \sin(\pi n t + \varphi)$$

Si le rapport de $(n_1 - n)$ à n et tel que, à chaque fois, après une demi-période du courant alternatif, l'angle de décalage ait crû de 180°, l'oscillation dans le système résonant est chaque fois, après une demi-période, à nouveau en phase avec la force électromotrice, sans que, dans l'intervalle, le décalage entre les deux ait jamais été de 180°. Cela explique d'une part que l'amplitude de l'oscillation ne s'annule jamais, et, d'autre part, que sa valeur maxima puisse atteindre une valeur plus élevée que lors de la résonance. Les points les plus intéressants, au point de vue général, dans ces phénomènes, sont sans doute les suivants :

a) Quand on observe les oscillations comme celle de la figure 1, on pense d'abord à des mouvements pendulaires. L'oscillation n'est cependant pas la résultante de deux oscillations de fréquences différentes : il n'y a, en fait, qu'une seule fréquence.

b) La valeur maxima de l'amplitude du courant ou de la tension n'est pas atteinte dans le cas de la figure 1, mais dans le cas de la figure 2, c'est-à-dire non dans le cas de la résonance mais quand la fréquence du système résonant diffère sensiblement de celle de l'harmonique. Quand on emploie la méthode de résonance indiquée au début, il faut donc faire une grande attention, quand il peut exister des harmoniques à phase alternante.

c) D'après la construction symétrique des machines monophasées et triphasées, il résulte que la force électromotrice de la machine peu chargée a, dans la seconde moitié de la periode, la même grandeur que dans la première moitié mais le signe opposé. De cette symétrie, on conclut généralement que la force électromotrice de machines monophasées et triphasées ne peut pas présenter d'harmoniques pairs.

Si l'on définit les harmoniques supérieurs comme les termes d'une série de Fourier représentant l'oscillation pendant une période entière, cette conclusion est correcte. Pour les oscillations présentant la symétrie indiquée, les termes de la série de Fourier dont les fréquences sont des multiples pairs de celle de l'onde fondamentale disparaissent réellement.

Il n'y a rien à objecter à l'emploi de la série de Fourier. On peut représenter par une série de Fourier la période entière de courbes du genre de celle que représente la figure 3 (gros trait). Mais, dans la série, il manquera le terme

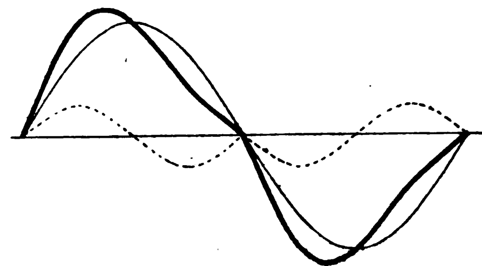


Fig. 3.

dont la fréquence est double de celle de l'onde fondamentale (courbe en trait interrompu), c'est-à-dire précisément le terme qui, à côté de l'onde fondamentale, contribue pour une grande part au phénomène oscillant total. Au lieu de cela, la série présentera un grand nombre d'harmoniques impairs dont chacun n'a presque aucun intérêt. Donc, dans le cas dont il s'agit, la décomposition de la période totale en série de Fourier est rigoureuse, mais donne une représentation inutilisable et incommode des conditions réelles.

Pour la représentation de phénomènes physiques, il vaut mieux étendre la notion d'oscillation harmonique, et il est plus pratique de dire qu'il existe un harmonique de fréquence déterminée quand il se produit un phénomène périodique de cette fréquence, que celui-ci dure ou non avec une amplitude et une phase invariables pendant toute la période de l'onde fondamentale : d'après cette définition, il résulterait que les courbes d'ondes d'alternateurs monophasés et triphasés peuvent présenter des harmoniques pairs ou impairs, mais que, pour les harmoniques pairs, il doit se produire, au moins après chaque demi-période de l'onde fondamentale, une alternance de phase de 180°.

R. V.

Théorie de la résonance d'ondes à phase alternante. — **W. Rogowski.** — *Drudes Annalen*, juillet 1906.

Dans l'étude qui précède, les auteurs ont signalé l'existence d'harmoniques supérieurs à phase alternante dans la courbe de force électromotrice d'alternateurs monophasés et triphasés. Ils ont décrit les phénomènes observés quand ces oscillations agissent sur un circuit de résistance W, de self-induction L et de capacité C. La présente étude se rapporte à la théorie de ce phénomène.

Si le circuit est soumis à l'action d'une force électromotrice variable en fonction du temps t, $E = f(t)$ on a, pour la charge Q du condensateur, l'équation différentielle connue :

$$L\frac{d^2Q}{dt^2} + W\frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{c} = f(t). \qquad (1)$$

L'auteur suppose que la fonction $f(t)$ soit du genre de celle que représente la figure 1 : elle

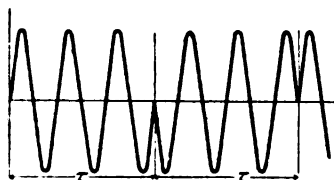


Fig. 1.

présente un changement de phase de 180° après certains intervalles de temps τ.

L'auteur définit la fonction $f(t)$ non par une série de Fourier mais de la façon suivante :

Pour le 1er intervalle ($t = o$ à $t = \tau$).

$$f(t) = E_0 \sin nt.$$

Pour le 2e intervalle ($t = \tau$ à $t = 2\tau$).

$$f(t) = -E_0 \sin nt.$$

Pour chaque intervalle impair suivant :

$$f(t) = E_0 \sin nt.$$

Pour chaque intervalle pair suivant :

$$f(t) = -E_0 \sin nt.$$

Les équations différentielles pour tous les intervalles ont la forme :

$$L\frac{d^2Q}{dt^2} + W\frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = \pm E_0 \sin nt.$$

Leur solution pour un intervalle quelconque, le λ^e par exemple, est de la forme :

$$Q = e^{-\frac{W}{2L}} [A_\lambda \sin \gamma t + B_\lambda \cos \gamma t]$$
$$\pm D \sin (nt + \varphi). \qquad (2)$$

Dans cette équation, comme dans tout ce qui suit, le signe supérieur se rapporte à une valeur impaire de λ et le signe inférieur à une valeur paire de λ. La grandeur γ, donnée par la relation :

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{W^2}{4L^2}}$$

représente le nombre d'oscillations propres du circuit en 2π secondes, et l'on a :

$$\text{tg}\,\varphi = \frac{W}{Ln - \frac{1}{Cn}}$$

$$D = \frac{E_0}{n\sqrt{W^2 + \left(Ln - \frac{1}{Cn}\right)^2}}.$$

Dans l'expression de Q, il faut prendre de nouvelles valeurs des constantes A_λ et B_λ pour chaque nouvel intervalle. Toutes ces constantes sont déterminées par l'état électrique initial donné. L'auteur se limite au cas où, au temps $t = o$ de la fermeture du courant, on a $Q = o$ et $i = dQ/dt$. Cette condition détermine d'abord les valeurs des constantes A_1 et B_1 et l'on peut, au moyen de la formule 2, calculer les valeurs de Q et i à la fin du premier intervalle. Les constantes pour le deuxième intervalle doivent être choisies de telle façon que les valeurs de Q et i au début de cet intervalle coïncident avec la valeur de ces grandeurs à la fin de l'intervalle précédent. On trouve que les constantes tendent vers certaines valeurs limites et que l'état stationnaire ainsi atteint peut être décrit très simplement.

Allure du courant lors de la résonance ($\gamma = n$). — Lors de la résonance, on a $\varphi = \pi/2$, $D = -E_0/Wn$; la charge Q et le courant i sont donnés, pour une intervalle quelconque λ, par les expressions suivantes :

$$Q = e^{-\frac{W}{2L}t} [A_\lambda \sin nt + B_\lambda \cos nt] \mp \frac{E_0}{Wn} \cos nt \quad (3a)$$

$$i = -e^{-\frac{W}{2L}t}\left[\left[A_\lambda \frac{W}{2L} + B_\lambda n\right] \sin nt + \left[B_\lambda \frac{W}{2L} - A_\lambda n\right] \cos nt\right] \pm \frac{E_0}{W} \sin nt. \quad (3b)$$

La condition que le courant i soit nul au temps $t = o$ entraîne entre les constantes A_1 et B_1 la relation

$$B_1 (W/2L) = A_1 n.$$

Le courant doit être nul à la fin du premier intervalle et au commencement du deuxième. Les constantes A_2 et B_2 doivent donc être liées entre elles par une relation analogue. Finalement, on voit qu'il doit exister entre les constantes A_λ et B_λ une relation :

$$\frac{B_\lambda W}{2L} = A_\lambda n. \qquad (4)$$

Pour tenir compte de la condition que la charge Q soit nulle au temps $t = o$, on calcule la charge Q''_λ existant à la fin du λ^e intervalle d'après la charge Q'_λ existant au début de cet intervalle. Pour un nombre impair λ, on obtient évidemment, en tenant compte de l'équation $3a$.

$$B_\lambda = \left(Q'_\lambda + \frac{E_0}{Wn}\right) e^{\frac{W}{2L}\lambda\tau}$$

et $$Q''_\lambda = -\frac{E_0}{Wn}\left[1 - a\left(\frac{Q'_\lambda}{(E_0/Wn)} + 1\right)\right]$$

en posant $$a = e^{-\frac{W}{2L}\tau}.$$

De même, pour un nombre pair λ, on a :

$$Q''_\lambda = \frac{E_0}{Wn}\left[1 + a\left(\frac{Q'_\lambda}{(E_0/Wn)} - 1\right)\right].$$

Avec ces formules, il est facile de calculer les valeurs successives des charges : on trouve pour le premier intervalle :

$$Q'_1 = o, \qquad Q''_1 = -\frac{E_0}{Wn}(1 - a).$$

Pour le second, on obtient les valeurs :

$$Q'_2 = -\frac{E_0}{Wn}(1 - a); \qquad Q''_2 = \frac{E_0}{Wn}(1 - 2a + a^2).$$

Pour le troisième, les valeurs sont :

$$Q'_3 = \frac{E_0}{Wn}(1 - 2a + a^2);$$

$$Q''_3 = -\frac{E_0}{Wn}(1 - 2a + 2a^2 - a^3).$$

La valeur de la charge à la fin d'un intervalle quelconque est donc donnée par l'expression

$$Q'' = \mp \frac{E_0}{Wn}[1 - 2a + 2a^2 - 2a^3 + 2a^4 - \cdots]$$

a est toujours compris entre o et 1. La valeur de Q'' tend donc vers une valeur limite

$$Q'' = \mp \frac{E_0}{Wn}\left(\frac{1 - a}{1 + a}\right). \qquad (5)$$

Quand cette valeur est atteinte, on a un état stationnaire.

On a alors :

$$B_\lambda = \pm \frac{2E_0}{Wn} \cdot \frac{1}{1 + a} e^{\frac{W}{2L}\lambda\tau}$$

$$A_\lambda = \pm \frac{E_0}{Ln^2} \frac{1}{1 + a} e^{\frac{W}{2L}\lambda\tau}.$$

La valeur du courant est la suivante :

$$i = \pm \frac{E_0}{W} \sin nt \left[1 - e^{-\frac{W}{L2}t} \cdot \frac{2}{1 + a}\left(1 + \frac{W}{4L^2n^2}\right)\right],$$

le temps t étant compris entre o et τ, et étant compté à nouveau à partir de o pour chaque nouvel intervalle.

Pour les harmoniques supérieurs dont il s'agit, le rapport $W^2/4L^2n^2$ est petit vis-à-vis de l'unité. Si on le néglige en comparaison de 1, on obtient l'équation

$$i = \pm \frac{E_0}{W} \sin nt \left[1 - e^{-\frac{W}{2L}t} \cdot \frac{2}{1 + a}\right]. \qquad (6)$$

La courbe de courant peut être considérée comme une sinusoïde d'amplitude variable : elle est symétrique par rapport à l'axe du temps. Les maxima et minima sont placés sur la portion de courbe donnée par l'équation

$$x = 1 - e^{-\frac{W}{2L}t} \cdot \frac{2}{1 + a},$$

qui s'annule une fois dans chaque intervalle. Au début et à la fin d'un intervalle, les valeurs sont égales et de signe opposé : la valeur numérique est d'autant plus voisine de l'unité que a s'approche plus de zéro et inversement. Le facteur x donne, en outre, le rapport du courant i au courant existant lors de la résonance ordinaire. Pour de faibles valeurs de la résistance, le rapport peut être petit. La figure 2 représente la

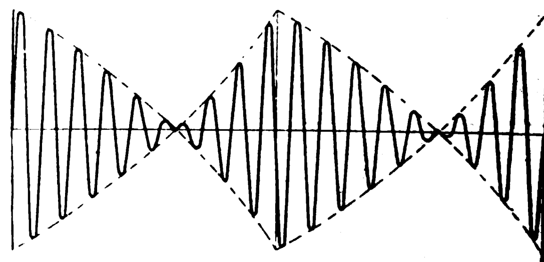


Fig. 2.

courbe de courant pour une valeur moyenne de a, 0,368. Dans le cas auquel cette figure est rela-

tive, on avait $W = 160$ ohms ; $L = 0{,}80$ henry ; $n = \gamma = 5660$; $\tau = 1/100$ seconde. Le moment du changement de phase est indiqué par l'ordonnée maxima de la courbe en trait interrompu dans laquelle est contenue la courbe du courant. Pour $W = 16$ ohms ($a = 0{,}90$) la surface comprise entre les courbes extérieures se rapproche d'un carré, le moment du changement de phase étant au milieu de la portion de l'axe de temps comprise entre deux passages par zéro. Pour $W = 1\,600$ ohms ($a = 4{,}5 \,.\, 10^{-5}$) les courbes qui enveloppent la courbe de courant tendent à être, sur la majeure partie de leur longueur, parallèles à l'axe des temps, le moment du changement de phase étant très voisin de la fin de l'intervalle. Les amplitudes de courant ont une valeur à peu près constante pendant presque tout l'intervalle et présentent une diminution rapide au moment du changement de phase.

Allure du courant dans le cas général ($n \neq \gamma$). — On pose $\gamma = n + 2$ et l'on calcule avec l'angle $\alpha = (\pi/2) - \varphi$. On a, pour la charge Q et le courant i du λ^e intervalle, les expressions :

$$Q = e^{-\frac{W}{2L}t}[\sin nt(A_\lambda \cos \varepsilon t - B_\lambda \sin \varepsilon t)$$

$$+ \cos nt(A_\lambda \sin \varepsilon t + B_\lambda \cos \varepsilon t) \pm D \cos(nt - \alpha)] \quad (7a)$$

$$i = -e^{-\frac{W}{2L}t}[\sin nt(R_\lambda \cos \varepsilon t - S_\lambda \sin \varepsilon t)$$

$$+ \cos nt(R_\lambda \sin \varepsilon t + S_\lambda \cos \varepsilon t) \mp D_n \sin(nt - \alpha)], \quad (7b)$$

expressions dans lesquelles on a :

$$R_\lambda = A_\lambda \frac{W}{2L} + B_\lambda \gamma ; \qquad S_\lambda = B_\lambda \frac{W}{2L} - A_\lambda \gamma .$$

On détermine comme précédemment les relations existant entre les valeurs Q'_λ et Q''_λ, i'_λ et i''_λ de la charge et du courant au début et à la fin du λ^e intervalle.

Si l'on pose pour abréger :

$$Q' - D \cos \alpha = G,$$
$$-(i' - Dn \sin \alpha) = F,$$
$$\frac{F}{\gamma} - \frac{W}{2L\gamma} G = H,$$
$$G\gamma - H \frac{W}{2L} = K,$$

les constantes pour un nombre λ *impair* sont données par les équations suivantes :

$$\left.\begin{aligned} A_\lambda &= e^{\frac{W}{2L}\lambda\tau}\{G \sin \varepsilon\lambda\tau - H \cos \varepsilon\lambda\tau\}, \\ B_\lambda &= e^{\frac{W}{2L}\lambda\tau}\{H \sin \varepsilon\lambda\tau + G \cos \varepsilon\lambda\tau\}, \\ R_\lambda &= e^{\frac{W}{2L}\lambda\tau}\{F \sin \varepsilon\lambda\tau + K \cos \varepsilon\lambda\tau\}, \\ S_\lambda &= e^{\frac{W}{2L}\lambda\tau}\{F \cos \varepsilon\lambda\tau - K \sin \varepsilon\lambda\tau\}. \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

On obtient alors pour les grandeurs cherchées les valeurs :

$$\left.\begin{aligned} Q''_\lambda &= D \cos \alpha + a\{G \cos \varepsilon\tau - H \sin \varepsilon\tau\}, \\ i''_\lambda &= Dn \sin \alpha - a\{F \cos \varepsilon\tau + K \sin \varepsilon\tau\}. \end{aligned}\right\} \quad (9)$$

Pour un nombre λ *pair*, il suffit de changer $+D$ en $-D$ dans les formules précédentes, et l'on obtient :

$$\left.\begin{aligned} Q''_\lambda &= -D \cos \alpha + a(g \cos \varepsilon\tau - h \sin \varepsilon\tau) \\ i''_\lambda &= -Dn \sin \alpha - a(f \cos \varepsilon\tau + k \sin \varepsilon\tau) \end{aligned}\right\} \quad (10)$$

en introduisant les abréviations analogues :

$$g = Q' + D \cos \alpha$$
$$f = -i' + Dn \sin \alpha$$
$$h = \frac{f}{\gamma} - \frac{W}{2L\gamma} g$$
$$k = g\gamma - \frac{W}{2L}\gamma .$$

Dans les équations 9 et 10, en tenant compte de la condition que la charge soit nulle au temps zéro, ainsi que le courant, on trouve pour le premier intervalle :

$$Q''_1 = D \cos \alpha + aM_1$$
$$i''_1 = Dn \sin \alpha + aN_1 .$$

Les termes aM_1, aN_1, aM_λ et aN_λ désignent des grandeurs qui disparaissent des équations pour l'état stationnnaire comme on le voit plus loin.

Pour le deuxième intervalle, on a :

$$Q'_2 = Q''_1 ; \qquad i'_2 = i''_2$$
$$Q''_2 = -D \cos \alpha(1 - 2\alpha\delta_1 + a^2 M_2)$$
$$i''_2 = -Dn \sin \alpha(1 - 2a\varepsilon_1 = a^2 N_2),$$

en posant pour simplifier l'écriture :

$$\delta_1 = \cos \varepsilon\tau + \frac{1}{\gamma}\left(n \operatorname{tg} \alpha + \frac{W}{2L}\right) \sin \varepsilon\tau$$

$$\varepsilon_1 = \cos \varepsilon\tau - \left[\frac{\gamma}{n \operatorname{tg} \alpha} + \frac{W}{2L\gamma}\left(1 + \frac{W}{2Ln \operatorname{tg} \alpha}\right)\right] \sin \varepsilon\tau .$$

En écrivant les équations relatives au troisième intervalle, on voit que les expressions du

courant et de la charge à la fin d'un intervalle quelconque sont les suivantes :

$$\left.\begin{aligned} Q'' &= \pm D\cos\alpha(1 - 2a\delta_1 + 2a^2\delta_2 - 2a^3\delta_3 + \cdots) \\ &= \pm D\cos\alpha(1 + 2l) \\ i'' &= \pm Dn\sin\alpha(1 - 2a\varepsilon_1 + 2a^2\varepsilon_2 - 2a^3\varepsilon_3 + \cdots) \\ &= \pm Dn\sin\alpha(1 + 2m). \end{aligned}\right\} \quad (11)$$

Deux grandeurs δ_λ et ε_λ sont liées aux grandeurs $\delta_{\lambda-1}$ et $\varepsilon_{\lambda-1}$ par les formules de récurrence

$$\delta_\lambda = \delta_{\lambda-1}\cos\varepsilon\tau + \frac{1}{\gamma}\left(n\,\mathrm{tg}\,\alpha\varepsilon_{\lambda-1} + \frac{W}{2L}\delta_{\lambda-1}\right)\sin\varepsilon\tau$$

$$\varepsilon_\lambda = \varepsilon_{\lambda-1}\cos\varepsilon\tau - \left[\frac{\delta_{\lambda-1}\gamma}{n\,\mathrm{tg}\,\alpha} + \frac{W}{2L\gamma}\left(\varepsilon_{\lambda-1} \mp \frac{\delta_{\lambda-1}}{n\,\mathrm{tg}\,\alpha}\frac{W}{2L}\right)\right]\sin\varepsilon\tau.$$

Le calcul des valeurs limites Q'' et τ'' se simplifie énormément quand $\sin\varepsilon\tau$ disparaît. Ce cas se produit quand la différence entre le nombre des oscillations forcées produites dans un intervalle et le nombre des oscillations propres existant dans le même intervalle est un multiple entier de $1/2$. Si la différence est un multiple pair de $1/2$, $\cos\varepsilon\tau$ est égal à l'unité, et l'on a :

$$Q'' = \pm D\cos\alpha[1 - 2a + 2a^2 - 2a^3 \cdots] = \pm D\cos\alpha\left(\frac{1-a}{1+a}\right)$$

$$i'' = \pm Dn\sin\alpha\left(\frac{1-a}{1+a}\right).$$

Si cette différence est un multiple impair de $1/2$, on a $\cos\varepsilon\tau = -1$, et l'on obtient les valeurs :

$$Q'' = \pm D\cos\alpha\left(\frac{1+a}{1-a}\right)$$

$$i'' = \pm Dn\sin\alpha\left(\frac{1+a}{1-a}\right).$$

On détermine au moyen des équations 8 les constantes A_λ B_λ R_λ S_λ correspondant aux valeurs de la charge et du courant données par les équations 11, et on les introduit dans la formule 7*b* du courant. On trouve comme résultat final :

$$i = \mp Dn\left[\sin(nt - \alpha) - \frac{2\sin\alpha}{\sin\beta}(1 + m)e^{-\frac{W}{2L}t}\sin(\gamma t - \beta)\right], \quad (12)$$

l'angle β étant donné par la formule

$$\mathrm{ctg}\,\beta = -K/F.$$

Le temps t doit être compris entre o et τ.

Dans le cas particulier où $\sin\varepsilon\tau$ disparaît, on a

$$m = l = \pm\frac{a}{1 \pm a}.$$

Quand $W/2L_\gamma$ a une valeur négligeable vis-à-vis de l'unité, on peut pour $\alpha = \beta$, et l'on obtient la formule :

$$i = \mp Dn\left[\sin(nt - \alpha) - \frac{2}{1 \pm a}e^{-\frac{W}{2L}t}\sin(\gamma t - \alpha)\right],$$

expression dans laquelle on doit prendre pour a le signe + ou — suivant que la différence entre le nombre des oscillations forcées et des oscillations propres existant dans un intervalle est un multiple pair ou impair de $1/2$.

D'après l'équation (12), le courant est la résultante d'une oscillation amortie et d'une oscillation non amortie. La première est entièrement identique à l'oscillation forcée que produirait une f. é. m. de même grandeur et fréquence de phase non alternante ; la dernière est l'oscillation propre du circuit. L'amplitude du courant ne peut donc pas être constante : si la grandeur a est très voisine de zéro (fort amortissement), l'oscillation amortie ne peut agir qu'au début d'un intervalle et l'amplitude du courant doit avoir en général une valeur constante, en ne présentant une chute rapide que directement après un changement de phase. Pour des valeurs très grandes et moyennes de la grandeur a (très faible amortissement ou amortissement moyen), on obtient des phénomènes pendulaires dont l'intensité dépend du rapport de l'amplitude de deux oscillations.

D'après ce qui précède, il est facile d'étudier les phénomènes qui se produisent et de tracer les courbes.

Si a est voisin de l'unité (amortissement très faible), on obtient les résultats suivants :

1° Si la différence entre le nombre des oscillations forcées et celui des oscillations propres existant dans un intervalle est un nombre entier, les amplitudes des oscillations interférentes sont à peu près égales. L'amplitude du courant oscille entre de très faibles valeurs et une valeur double de l'amplitude des oscillations ;

2° Si la différence est un multiple impair de $1/2$, l'amplitude de l'oscillation amortie dépasse de beaucoup celle de l'oscillation non amortie : en pratique on a une amplitude à peu près constante.

Quand la valeur de l'amortissement augmente (diminution de la valeur de *a*), les variations de l'amplitude de courant diminuent dans le premier cas, tandis qu'elles augmentent dans le deuxième cas.

On peut étudier facilement les résultats pour le courant efficace J lors de la résonance et tracer les courbes de résonance.

R. V.

ÉCLAIRAGE

Expériences sur la détermination de l'intensité lumineuse sphérique ou hémisphérique moyenne *(fin)*. — **B. Monasch.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 26 juillet 1906.

Quand on doit déterminer à nouveau la constante de la sphère à cause de la présence des différents corps étrangers, il semble que la méthode d'Ulbricht avec une lampe à incandescence étalonnée placée dans la sphère avec la lampe à arc doive être préférée à la méthode de Bloch dans laquelle on détermine d'abord à l'extérieur de la sphère, par un tracé point par point, l'intensité lumineuse de la lampe à arc dans l'espace. L'auteur a trouvé que cette dernière méthode conduit souvent à des erreurs de 10 à 12 °/₀ dans l'évaluation de l'intensité lumineuse sphérique.

Quand on emploie des lampes à incandescence tarées, il faut éviter que des rayons lumineux tombent directement sur les armatures. Ulbricht place, pour cela, la lampe étalon à la partie inférieure de la sphère et la recouvre d'un petit écran. Dans les expériences auxquelles se rapporte le tableau IV, on a employé une lampe Nernst à bâtonnet horizontal sans globe placé au-dessous de la lampe à arc. De telles lampes n'émettent à peu près aucun flux lumineux dans l'hémisphère supérieure ; dans les mesures du tableau IV, les rayons directs de la lampe Nernst tombaient uniquement sur les parois de la sphère. Les armatures et les tiges n'absorbaient que de la lumière réfléchie par les parois de la sphère.

Demi-sphère recouverte : diamètre 2 mètres. — Dans le couvercle de la demi-sphère était ménagée une ouverture de 2 centimètres de diamètre pour le passage des fils conducteurs. Le couvercle était recouvert du même revêtement blanc mat à réflexion diffuse que les parois de la demi-sphère. Pour étalonner la demi-sphère, on se servit des quatre lampes à incandescence déjà employées ; leur centre se trouvait, pendant l'étalonnage, à 25 centimètres au-dessous du couvercle. Le photomètre était placé à la fenêtre placée à 15° au-dessous de l'horizontale. Les résultats de l'étalonnage sont indiqués par le tableau V.

TABLEAU V

LAMPE N°	AMPÈRES	VOLTS	r EN MOYENNE	CONSTANTE de LA FENÊTRE	ÉCLAIREMENT DE LA FENÊTRE E	J_0 d'après LE TABLEAU II	$K_D = \frac{J_0}{E}$	DIFFÉRENCE EN °/₀ de la valeur moyenne de K_D.
I.	0,65	100	14,00	2,29	117 Lux	11,58	0,0989	+ 0,1 °/₀
II.	0,82	100	12,48	2,29	147,5 Lux	14,50	0,0984	— 0,4
III.	1,12	100	10,90	2,29	194 Lux	19,12	0,0986	— 0,2
IV.	2,49	100	6,70	2,29	512 Lux	50,95	0,0994	+ 0,6
Moyenne.							0,0988	

On voit que les écarts par rapport à la valeur moyenne de la constante de la demi-sphère n'atteignent pas 1 °/₀. Pour l'étude de l'action de la demi-sphère recouverte avec des sources lumineuses axialement asymétriques, on employa une lampe Nernst modèle B sans globe avec bâtonnet horizontal. Ce dernier était placé à 5 centimètres au-dessous du couvercle au-dessous du centre de la sphère. L'intensité lumineuse sphérique de la lampe Nernst fut déterminée avec le photomètre en face de la fenêtre située à 15° au-dessous de l'horizontale comme précédemment. Le bâtonnet incandescent fut placé dans le plan du méridien d'observation, pris dans une position

perpendiculaire. On répéta les mesures en employant les autres fenêtres de la demi-sphère, et en plaçant le bâtonnet dans l'une et l'autre position. Les écarts en °/₀ de la valeur de l'intensité lumineuse sphérique obtenue dans la première mesure sont indiqués dans la dernière colonne du tableau VI.

TABLEAU VI

LAMPE	AMPÈRES	VOLTS	MÉRIDIEN D'OBSERVATION	ANGLE AU CENTRE	r EN MOYENNE	CONSTANTE de LA FENÊTRE	ÉCLAIREMENT E	CONSTANTE de la DEMI-SPHÈRE K_n d'après le tab. I.	J_o CALCULÉ	ÉCART EN °/₀ DE J_o
Nernst B. . . .	0,475	110	II	15° au-dessous de l'horiz.	10,72	2,29	200	0,0988	19,75	Étalonnage.
—	0,475	110	I	—	10,61	2,29	203	0,0988	20,10	+ 1,77 °/₀
—	0,475	110	I	5° au-dessous de l'horiz.	10,77	2,29	197,5	0,0988	19,50	— 1,26
—	0,475	110	II	—	10,76	2,29	198	0,0988	19,55	— 1,0
—	0,475	110	I	25° au-dessous de l'horiz.	10,77	2,29	197,5	0,0988	19,50	— 1,26
—	0,475	110	II	—	10,76	2,29	198	0,0988	19,55	— 1,0
—	0,475	110	II	35° au-dessous de l'horiz	10,65	2,29	202	0,0988	19,90	+ 0,76
—	0,475	110	I	—	10,75	2,29	198,5	0,0988	19,60	— 0,76
—	0,475	110	I	45° au-dessous de l'horiz.	10,75	2,29	198,5	0,0988	19,60	— 0,76
—	0,475	110	II	—	10,76	2,29	198	0,0988	19,55	— 1,0
—	0,475	110	II	55° au-dessous de l'horiz.	10,76	2,29	198	0,0988	19,55	— 1
—	0,475	110	I	—	10,72	2,29	200	0,0988	19,75	± 0

Les chiffres du tableau VI montrent que le plus grand écart observé dans les différentes positions pour l'intensité lumineuse sphérique est de + 1,77 °/₀ ou — 1,26 °/₀. Ces erreurs sont du même ordre de grandeur que celles trouvées avec la sphère entière et sont négligeables en pratique, car elles proviennent seulement d'erreurs de lecture au photomètre.

Les résultats de cette série d'expériences montrent que, dans la sphère recouverte, l'éclairement de la fenêtre d'observation par la lumière indirecte est pratiquement indépendant de la position de la source lumineuse dans la demi-sphère, du choix de la fenêtre d'observation, et de la forme de la courbe de radiation de la source lumineuse. La demi-sphère est donc équivalente, pour ces mesures, à la sphère entière de même diamètre. Il semble que, pour la constitution de photomètres intégrateurs, on puisse employer aussi d'autres corps creux de forme stéréométrique.

Pour les mesures pratiques, la demi-sphère recouverte présente certains avantages, en particulier avec de grands diamètres. Les dépenses d'établissement sont inférieures à la moitié de celles d'une sphère entière : l'exécution des mesures est beaucoup plus facile à cause de la moins grande hauteur de l'appareil intégrateur. On peut constituer le couvercle par une série de pièces annulaires s'emboîtant les unes dans les autres : de cette façon on peut donner facilement à l'ouverture la grandeur nécessaire pour le passage de la lampe à étudier.

Photométrie de lampes à arc axialement asymétriques. — L'auteur a déjà attiré l'attention sur les erreurs commises lorsque l'on détermine l'intensité hémisphérique moyenne de lampes à arc à électrodes inclinées (lampes à arc intensives) en mesurant l'intensité lumineuse dans un plan méridien quelconque comme pour les lampes à électrodes verticales superposées. Bloch a indiqué une méthode approchée permettant de déterminer, au moyen d'une courbe méridienne et de deux cercles horizontaux, l'intensité lumineuse des lampes à charbons inclinés comme celles des lampes à charbons superposés.

L'auteur a étudié, par un grand nombre d'observations, la grandeur de l'asymétrie pour différentes sortes de charbons dans des cas pratiques. Si l'on relève les courbes planes de radiation lumineuse dans quatre méridiens décalés de 90°, on obtient une image suffisante. Dans ce qui suit, l'auteur désigne, pour abréger, sous le nom de plan à 0° celui qui passe par les axes des char-

bons et pour lequel la cathode est la plus rapprochée du photomètre ou de l'œil de l'observateur, par plan à 90° ou 270° celui qui est perpendiculaire au plan des charbons, et par plan à 180° celui pour lequel l'anode est la plus rapprochée du photomètre ou de l'œil. Si, dans chacun de ces plans, on relève point par point la courbe de radiation lumineuse, on peut déterminer, d'après les courbes obtenues, l'intensité hémisphérique moyenne qui existerait si la source lumineuse était axialement symétrique. Soient J_0, J_{180}, J_{270} les valeurs provisoires de l'intensité hémisphérique ainsi obtenues : le rapport de ces intensités lumineuses à J_0 est appelé « asymétrie » par l'auteur.

Si les diamètres des charbons d'une lampe sont choisis de telle sorte que les longueurs brûlées dans un temps donné soient égales et qu'il ne se forme pas de bec sur l'un des charbons, l'intensité lumineuse hémisphérique provisoire présente la plus grande valeur car, dans cette position, la lumière émanant du cratère positif pénètre dans le photomètre. Dans le plan à 180°, l'intensité hémisphérique provisoire présente généralement un minimum. J_{180} peut être plus grand que J_0 s'il se forme à la cathode un long bec empêchant la radiation lumineuse du cratère positif de pénétrer dans le photomètre à proximité de l'horizontale. Avec quelques expériences, on peut tirer des valeurs des rapports de J_{90} J_{180} et J_{270} à J_0 quelques conclusions sur la forme des pointes des charbons pendant la mesure.

Dans de nombreuses expériences sur l'asymétrie présentée par des charbons à effet, de différentes provenances, pour la lumière jaune, l'auteur a trouvé pour les différentes intensités hémisphériques provisoires des écarts par rapport à J_0 atteignant au minimum 8 °/₀ et au maximum 25 °/₀.

Avec des charbons purs, c'est-à-dire des charbons ne contenant aucune adjonction, l'arc lui-même produit beaucoup moins de lumière qu'avec des charbons à effet. Le grand éclat du cratère doit augmenter l'asymétrie : en outre, les pointes brûlent de telle façon qu'elles augmenmentent l'asymétrie, particulièrement quand l'air est limité et la différence de potentiel élevée. Les observations faites sur des charbons purs ont, par suite, indiqué une asymétrie moyenne de 15 °/₀ au minimum et 50 °/₀ de J_0 au maximum.

L'auteur cite l'exemple d'une lampe intensive à charbons purs. L'arc était entouré d'un petit globe intérieur opale. L'anode était un charbon à mèche Siemens de 9^mm^,5 de diamètre ; la cathode était un charbon Siemens homogène de 7 millimètres de diamètre. L'intensité du courant était de 10,3 ampères; la différence de potentiel aux bornes de 89,4 volts. Les intensités lumineuses provisoires ont été les suivantes :

$J_0 = 1\,480$ bougies ; $J_{90} = 1\,260$; $J_{180} = 860$; $J_{270} = 1\,260$ bougies.

L'asymétrie a les valeurs suivantes :

J/J_0	J_{90}/J_0	J_{180}/J_0	J_{270}/J_0
$a = 1$	0,85	0,58	0,85

La forme des pointes était normale. L'intensité hémisphérique moyenne est la moyenne des quatre valeurs ci-dessus : elle est donc égale à 1 215 bougies. On obtient la même valeur en formant une courbe moyenne avec les ordonnées des quatre courbes de radiation lumineuse et en déterminant l'intensité hémisphérique moyenne avec cette seule courbe. Pour l'exemple cité par l'auteur, on trouve ainsi 1 224 bougies. L'écart avec la valeur est donc de 0,75 °/₀ et provient d'une erreur inévitable dans le planimétrage.

Le tracé de quatre courbes perd beaucoup de temps. Avec la méthode de Bloch [1], on relève entièrement une courbe méridienne, puis l'on fait la mesure pour trois points à 90° sur deux parallèles. Si l'on applique cette méthode à l'exemple précédent, on trouve $J_{\smile} = 1\,218$ bougies. La valeur trouvée varie un peu avec les cercles parallèles employés, dont le choix est arbitraire. Ainsi, dans l'exemple pris, on trouve 1 175 bougies pour $J_{\smile}$ quand on choisit les parallèles à 0° et 45°, tandis que l'on trouve 1 218 bougies en prenant les cercles à 10° et 45°.

On doit s'attendre à ce que le photomètre intégrateur, et particulièrement la demi-sphère, permette la plus rapide et la plus exacte détermination de l'intensité hémisphérique moyenne. En fait, pour l'exemple précédent, on a trouvé 1 200 bougies pour 10,8 ampères et 89 volts en employant la fenêtre d'observation située 5° au-dessous de l'horizontale. L'arc avait été placé dans le cercle de la calotte et l'intensité lumineuse fut mesurée pour différentes positions de l'arc par rapport au méridien d'observation. Les résultats des mesures sont indiqués par le tableau VII.

(1) Voir *Éclairage Électrique*, tome XLVII, 16 juin 1906, p. 431.

TABLEAU VII

FENÊTRE D'OBSERVATION	POSITION DE L'ARC par rapport au méridien d'observation.	LAMPE A ARC — Ampères	LAMPE A ARC — Volts	R	LECTURES au photomètre r.	VALEUR moyenne de r.	INTENSITÉ lumineuse hémisphérique J_{φ}.	ÉCART EN % de la valeur moyenne de J_{φ}.
5° au-dessous de l'horizont.	Plan 90° . .	9,8	90	40,6	11,90	11,84	1 122 b.	— 2,00 %
		9,7	95	40,6	11,75			
		9,7	94	40,6	11,90			
		9,8	92	40,6	11,80			
—	Plan 180° . .	9,9	88	40,6	11,80	11,84	1 122	— 2,00
		9,6	93	40,6	11,80			
		9,7	94	40,6	11,90			
		9,6	95	40,6	11,85			
—	Plan 0° . .	9,7	94	40,6	11,95	11,82	1 128	— 1,50
		9,8	93	40,6	11,75			
		9,8	90	40,6	11,80			
		9,7	92	40,6	11,80			
15° au-dessous de l'horizont.	Plan 0° . .	9,8	94	44,2	12,60	12,69	1 175	+ 2,63
		9,6	97	44,2	12,70			
		9,8	94	44,2	12,70			
		9,7	92	44,2	12,75			
—	Plan 90° . .	9,8	91	44,2	12,60	12,60	1 180	+ 3,07
		9,9	89	44,2	12,70			
		9,6	93	44,2	12,60			
		9,8	93	44,2	12,50			
—	Plan 180° . .	9,5	87	44,2	12,90	12,72	1 172	+ 2,37
		9,6	88	44,2	12,75			
		9,7	88	44,2	12,60			
		9,5	90	44,2	12,65			
25° au-dessous de l'horizont.	Plan 180° . .	9,5	93	40,2	11,60	11,72	1 125	— 1,76
		9,5	92	40,2	11,70			
		9,6	92	40,2	11,80			
		9,4	93	40,2	11,80			
—	Plan 90° . .	9,6	91	40,2	11,90	11,86	1 100	— 3,95
		9,5	87	40,2	11,95			
		9,6	91	40,2	11,70			
		9,7	90	40,2	11,80			
—	Plan 0° . .	9,7	88	40,2	11,70	11,81	1 110	— 3,10
		9,6	92	40,2	11,75			
		9,6	92	40,2	11,90			
		9,6	92	40,2	11,90			
35° au-dessous de l'horizont.	Plan 0° . .	9,6	90	52,0	14,90	14,90	1 165	+ 1,76
		10,2	93	52,0	14,80			
		9,6	91	52,0	14,90			
		10,1	93	52,0	15,10			
—	Plan 90° . .	9,7	93	52,0	14,90	14,90	1 165	+ 1,76
		9,6	91	52,0	14,95			
		9,8	91	52,0	14,90			
		9,6	93	52,0	14,75			
—	Plan 180° . .	9,4	93	52,0	14,80	14,82	1 180	+ 3,1
		9,6	91	52,0	14,90			
		9,6	90	52,0	14,80			
		9,5	94	52,0	14,80			

Valeur moyenne de J_{φ} = 1 145 b.

La constante K_F de la demi-sphère et la constante c de la fenêtre avaient été réunies en une seule constante C telle que, pendant la mesure, l'intensité lumineuse fut $J_{\cup} = CR^2/r^2$.

Dans une expérience préliminaire, on avait trouvé pour C la valeur 95,5. Pendant les mesures faites avec la demi-sphère, l'intensité du courant dans la lampe était un peu plus faible que lors du tracé des courbes point par point. C'est pourquoi l'on a trouvé comme valeur moyenne de $J_{\cup}$ 1 145 bougies au lieu de 1 200.

Comme on le voit d'après les chiffres du tableau VII, l'asymétrie de la source lumineuse est pratiquement compensée pour toutes les fenêtres d'observation. Les écarts par rapport à la valeur $J_{\cup}$ dans les différentes positions atteignent au maximum $+3\ \%$ à $-3\ \%$, erreur absolument admissible pour des mesures de lampes à arc aussi instables que les lampes intensives. L'exactitude obtenue avec la demi-sphère est donc la même que celle obtenue avec la sphère entière de même diamètre.

E. B.

ÉLECTROMÉTALLURGIE

***La sidérurgie électrothermique.* — E. Stassano** [1]. — Communication faite au *VIe Congrès de Chimie appliquée*, à Rome.

Comme on sait, on n'utilise dans les fours ordinaires qu'une très faible partie de pouvoir calorifique des combustibles employés. D'autre part, la quantité de chaleur utilisée réellement varie avec le dispositif du four et le mode de chauffage.

En moyenne, le rendement thermique des combustibles industriels est de 2 à 3 % seulement pour un feu de forge; de 5 à 10 % avec les appareils dans lesquels l'échauffement se produit à travers des parois en matières réfractaires, par exemple les creusets; de 10 à 20 % dans les fours à manche et les fours à sole de petite et moyenne hauteur; enfin, de 30, 50 et juqu'à 70 % dans les cubilots et les hauts-fourneaux.

Ce faible rendement thermique tient, en grande partie, à ce que l'élément comburant, l'oxygène, se trouve dilué dans un gaz inerte, l'azote, qui, pendant la combustion, absorbe pour se dégager une grande quantité de chaleur ce qui abaisse la température et force à donner de grandes dimensions à la chambre de combustion. Il se produit, par conséquent, de grandes pertes de chaleur par rayonnement des parois ainsi que par convection; on comprend dès lors pourquoi, en utilisant la chaleur développée par la transformation en énergie thermique de l'énergie électrique, on peut obtenir un rendement élevé. C'est précisément parce que, la source de chaleur n'étant pas due à la combustion, on évite la cause de perte la plus importante.

Si l'on prend 20 % comme valeur moyenne du rendement thermique des combustibles utilisés en métallurgie, et si on évalue à 50 % seulement le rendement thermique de l'énergie électrique, on établit facilement dans quelles limites la substitution du chauffage électrique au chauffage par combustion est réalisable industriellement, ainsi que l'économie qui en résulte.

Le pouvoir calorifique moyen des combustibles industriels est, en pratique de 6 500 calories; d'autre part, la transformation, en énergie thermique d'une quantité d'énergie électrique de

---

(1) Le major Stassano a été l'un des premiers à se préoccuper de l'électro-sidérurgie et sa communication mérite d'être analysée en détail. Cette communication ne concerne d'ailleurs que ses études personnelles et l'on pourra consulter sur le même sujet dans l'*Eclairage Electrique* : tome XXIV, 25 août 1900, page 312, la communication de M. Keller au *Congrès International d'Electricité*; tome XXXIII, 11 octobre 1902, page 45, l'article de M. Ch. Bertolus sur la fabrication électrothermique de l'acier à l'usine de Kerrousse (Morbihan); même tome, 15 novembre 1902, page 228, l'article J. Reyval : fabrication électrothermique de l'acier par le procédé Harmet; tome xxxvii, 24 octobre 1903, page 148, H. Godlschmidt : production du fer et de l'acier au four électrique; même tome, 7 novembre 1903, page 228, A. Keller : sur l'électrométallurgie du fer et de l'acier; tome XXXVIII, 9 janvier 1904, page 49, Gin : fabrication électrique de l'acier; tome XL, 9 juillet 1904, page 65, F. A. Kjellin : les fours électriques pour la fabrication de l'acier à Gysinge; tome XLV, 18 novembre 1905, page 280, Engelhardt : le four électrique d'induction dans la fabrication de l'acier; tome XLI, 19 novembre 1904, page 309, l'état actuel de l'électrométallurgie du fer et et de l'acier. Afin de ne pas alourdir inutilement cette note bibliographique nous n'indiquons, parmi les articles publiés dans notre revue, que les plus importants.

En ce qui concerne le procédé Froges-Héroult, on lira avec intérêt l'article de M. Ch. Combes publié par la *Revue de Métallurgie* en janvier 1905. On sait que M. Héroult auquel on doit l'électrométallurgie de l'aluminium a commencé ses travaux sur l'électro-sidérurgie en mars 1900, sur les conseils de M. ombes, professeur de métallurgie à l'Ecole de Physique et imie.

N. D. L. R.

1 cheval produit 635 calories. D'après les rendements admis il faudra :

$$\frac{6500 \times 20}{100} : \frac{635 \times 50}{100} = 4,22$$

chevaux pour produire le même travail thermique que celui que procure un kilogramme de combustible.

Les usines génératrices hydro-électriques peuvent, pour la plupart, produire le cheval-an électrique à un prix ne dépassant pas 40 francs([1]). Dans ces conditions, si l'on arrive à utiliser 50 % de la chaleur produite, le four électrique peut fonctionner dans les mêmes conditions économiques que si l'on utilisait du charbon ne coûtant que $4,22 \times 0,005 = 0,021$ franc le kilogramme soit 21 francs la tonne([2]).

En dehors de ces chiffres approximatifs, on trouve une autre raison en faveur des procédés électrothermiques : en métallurgie, dans la plupart des cas, le charbon ne sert pas seulement directement ou indirectement comme agent réducteur, mais aussi comme source de chaleur. C'est pourquoi il est impossible, notamment dans la métallurgie du fer, lorsque le minerai se trouve directement en contact avec le combustible pendant la réduction, de déterminer rigoureusement la quantité de charbon nécessaire pour effectuer la réduction du minerai et celle qu'il faut pour produire la température voulue. On est obligé d'employer un excès de combustible, excès qui se trouve absorbé partiellement par le métal au fur et à mesure que le minerai se réduit. On n'obtient, par conséquent, après la première réduction, qu'un carbure, du métal que l'on veut extraire et ce produit doit être soumis à plusieurs affinages successifs. De plus, pendant la période de réduction, certaines impuretés contenues dans les combustibles et dans l'air nécessaire à la combustion se mélangent au métal, en modifient la composition et donnent lieu à des réactions parasites qui nuisent, en général, à la réussite et à l'économie des opérations suivantes. Le procédé électrothermique, qui ne nécessite ni combustible, ni comburant, ne présente plus ces inconvénients.

En outre, on sait que le rendement thermique d'une opération métallurgique déterminée est d'autant plus élevé que la différence de température entre la source de chaleur et la matière à chauffer est plus grande. De même, plus l'atmosphère ambiante est à une température élevée, plus les réactions chimiques qui se produisent dans cette atmosphère sont actives.

On peut ajouter enfin que l'énergie électrique utilisée pour les fours électriques étant fournie en général par des forces motrices hydrauliques, les appareils doivent être installés pour une marche continue et à pleine charge pour fonctionner dans les meilleures conditions économiques.

Les avantages des méthodes électrothermiques se trouveront de beaucoup augmentés si on réalise à peu près complètement ces conditions. Les nouveaux procédés permettront non seulement à la grande industrie métallurgique de s'installer dans les localités dépourvues de combustibles naturels et possédant d'importantes forces motrices hydrauliques, mais encore certaines applications spéciales là même où le combustible peut être obtenu à bon marché et où il semblerait, à première vue, qu'une application pratique n'est pas réalisable ([3]).

En résumé, on peut dire que, pour utiliser industriellement et dans de bonnes conditions la

---

([1]) A Terni, le prix de revient du cheval-an électrique n'est que de 27 francs.

([2]) Il y a lieu de remarquer, pour les calculs qui précèdent, que le rendement thermique des combustibles dans un four industriel a été indiqué avec une valeur plus élevée que celle que l'on rencontre dans la pratique ; on a supposé de plus que, dans les nouveaux fours électriques, on utiliserait 50 % seulement de la chaleur produite et le prix du cheval-an électrique a été établi pour 8 000 heures seulement d'utilisation par an. En réalité, on utilise l'installation hydraulico-électrique pendant 8 760 heures, c'est-à-dire sans interruption. Cette utilisation pendant 8760 heures a été admise par la commission envoyée en 1904 par le gouvernement canadien pour étudier les installations électrométallurgiques en Europe.

Il faut encore tenir compte de ce fait que beaucoup d'opérations métallurgiques exigent l'emploi de combustibles spéciaux, tels que le coke, qui coûtent plus cher que la houille naturelle dont le prix tend, d'ailleurs, à augmenter.

([3]) Par exemple, et en estimant comme l'admettent la plupart des métallurgistes, que le haut fourneau et le four Martin restent économiquement supérieurs au four électrique, — nous verrons plus loin que ce n'est pas l'avis du major Stassano, — il est indéniable que le four électrique a de grands avantages sur le creuset. On peut donc concevoir une installation de hauts fourneaux qui serait doublée d'une installation électrique pour la fabrication des aciers au creuset. L'utilisation des gaz de hauts fourneaux pour la production d'énergie électrique fournirait cette énergie dans des conditions économiques excellentes.

N. D. L. R.

chaleur produite par la transformation en énergie thermique de l'énergie électrique il suffit que les appareils employés remplissent les conditions suivantes :

1° L'enceinte dans laquelle s'effectuent la transformation en énergie thermique de l'énergie électrique, ainsi que les opérations métallurgiques qui nécessitent cette chaleur, doit être à l'abri de l'action directe de l'air atmosphérique et construite en matériaux neutres au point de vue chimique.

2° La chaleur développée par la transformation doit être produite à la plus haute température possible.

3° Les matières à traiter ne doivent pas être en contact direct avec des corps étrangers susceptibles de modifier leur composition de façon nuisible.

4° Enfin, les appareils dans lesquels doivent s'effectuer les diverses opérations métallurgiques sous l'action de la chaleur produite par l'énergie électrique, ainsi que les procédés permettant d'obtenir les produits voulus, doivent être étudiés et construits de manière à réaliser un fonctionnement continu et à pleine charge.

* * *

C'est en se basant sur ces principes que le major Stassano a poursuivi ses recherches et ses expériences[1]. Il donne dans cette communication la description des deux types de four qui lui ont permis de résoudre les différents problèmes que présentent l'électrométallurgie en général, et, plus particulièrement la sidérurgie électrothermique.

Le four tournant (fig. 1, 2, 3) est constitué par une enveloppe métallique de forme cylindrique se terminant en tronc de cône à sa partie supérieure ; cette enveloppe est garnie intérieurement de matières réfractaires. La chambre de fusion, disposée au centre de cette enveloppe, est de forme cylindrique et fermée, à sa partie supérieure, par une calotte sphérique. Des ouvertures de dimensions appropriées ont été pratiquées dans les parois du four pour donner passage aux électrodes qui doivent pénétrer à l'intérieur de la chambre de fusion et dont les extrémités doivent pouvoir entrer en contact au centre même de la chambre ce qui permet de produire un arc voltaïque au-dessus de la sole du four et à une distance convenable[1]. En regard de chacune des ouvertures se trouve un cylindre métallique

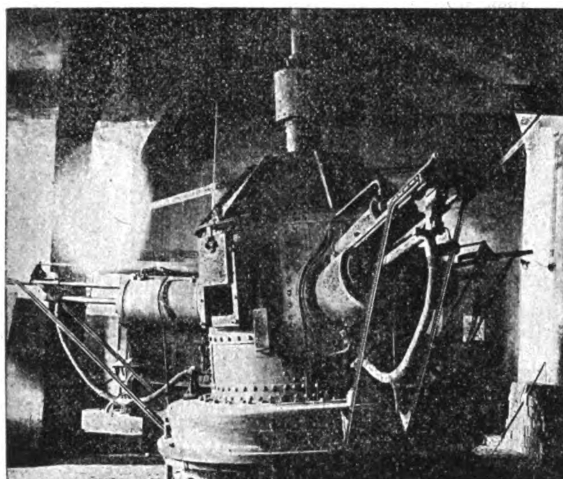


Fig. 1. — Four électrique Stassano.

à double enveloppe muni extérieurement de tiges servant à maintenir et à guider l'électrode de charbon. A l'aide d'un manchon approprié chaque électrode est reliée à une tige métallique qui la met en communication, par l'intermédiaire d'un câble souple, avec la prise de courant disposée à la partie inférieure de l'enveloppe métallique du four.

(1) Les détails des recherches et des expériences, faites pour déterminer le type définitif du four établi par lui, ont été donnés par le major Stassano, en 1902, dans la *Rivista di Artiglieria e Genio*.

(1) Comme on voit le four Stassano est un four à arc. On peut diviser en cinq groupes les différents types de fours électriques actuellement utilisés en électro-sidérurgie : 1° les fours à arc (four Stassano et four Ramon Chavarria Contardo, ce dernier différant très peu du four Stassano comme construction générale) ; 2° fours chauffant par arc au début de l'opération et achevant la chauffe par l'effet Joule : les électrodes sont, dans ce cas, plongées dans la matière à traiter ; un arc s'établit tant que cette matière, mise en faible quantité, n'est pas fondue ; la fusion se maintient ensuite par le dégagement de chaleur produit par l'effet Joule. On ajoute alors de nouvelles quantités de matières et l'opération devient continue. Parmi ces fours il faut citer les fours Héroult, Keller, Harmet, etc. 3° fours à effet Joule, avec résistance granulaire (type du four Paul Girod, à Albertville, Fribourg, Ugine) ; 4° fours à effet Joule à chauffage direct (ce four, dans lequel les électrodes ne sont pas en contact avec la matière à traiter, correspond au type établi par M. Gustave Gin) ; 5° fours utilisant les courants induits (type du four Kjellin, à Gysinge).

N. D. L. R.

Dans la double enveloppe du cylindre métallique, servant de porte-électrode, on fait circuler un courant d'eau pour maintenir à une température relativement basse la partie métallique du

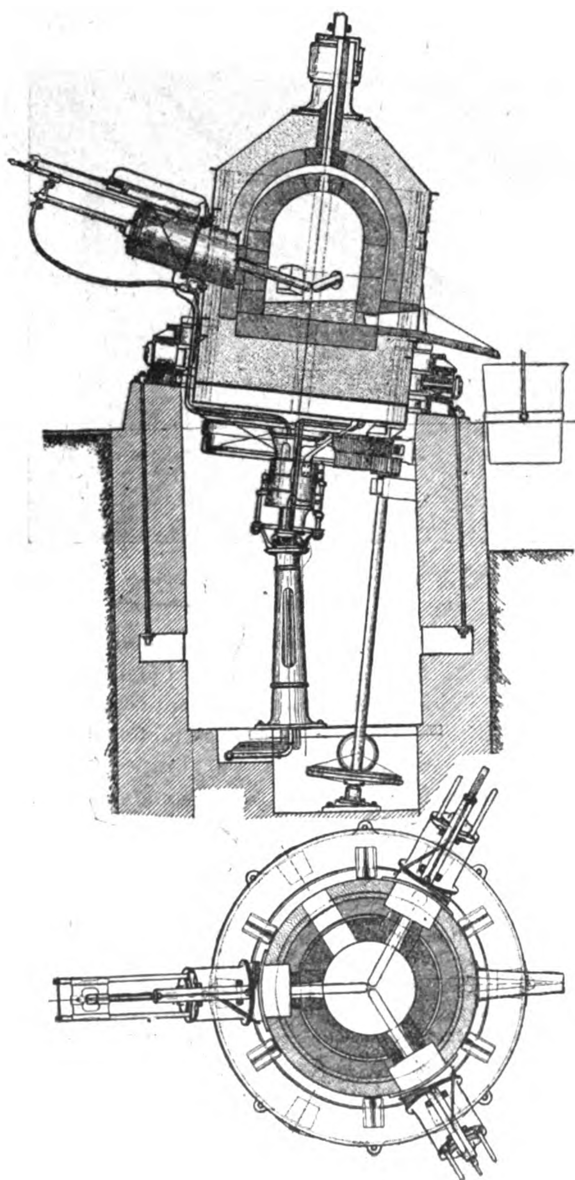


Fig. 2 et 3. — Coupe verticale et horizontale du four tournant Stassano.

porte-électrode où se place le charbon, afin d'obtenir un contact électrique aussi bon que possible.

A la partie supérieure des cylindres renfermant les électrodes, se trouve un cylindre hydraulique muni d'un piston, dont la tige est disposée dans un plan passant par l'axe du cylindre et est reliée à la tige du porte-charbon.

On comprend facilement qu'en injectant de l'eau sous pression sur l'une ou l'autre des faces du piston, celui-ci puisse se déplacer à l'intérieur du cylindre et avec lui la tige porte-électrode à laquelle il est relié.

L'ensemble du four repose, par l'intermédiaire d'une sorte de ceinture solidement fixée à l'enveloppe métallique extérieure, sur une couronne métallique munie de roues tronconiques qui reposent et peuvent tourner librement sur une pièce circulaire en fonte dont la face supérieure affecte la forme d'un tronc de cône très évasé. Cette pièce circulaire n'est pas placée horizontalement ; elle est fixée sur des piliers en maçonnerie et dans une position incliné, de telle sorte que l'axe du four se trouve également incliné par rapport à la verticale.

A la partie inférieure de l'enveloppe métallique du four est fixée une solide roue dentée engrenant avec un pignon que porte un arbre, commandé à son tour par un engrenage conique. On peut ainsi imprimer un mouvement de rotation à l'ensemble du four autour de son axe.

Au centre de la roue dentée, placée sur la face inférieure de la carcasse du four, sont fixés des anneaux de cuivre isolés de la masse, auxquels sont reliés, par l'intermédiaire de barres de cuivre, les câbles flexibles allant aux porte-électrodes.

Une série de balais, montés sur un support m llique placé au centre de la cavité ménagée au-dessous du four, appuient sur les anneaux de cuivre et sont reliés aux conducteurs venant de la génératrice. On obtient ainsi une communication permanente entre la génératrice et les électrodes, soit que le four reste immobile, soit qu'il tourne.

A la partie supérieure du support des balais est installée une prise d'eau sous pression qui sert à mettre en fonctionnement les cylindres hydrauliques utilisés pour la commande des électrodes, et aussi à alimenter les cylindres réfrigérants. Cette prise d'eau est établie de manière à assurer la circulation aussi bien lorsque le four est en mouvement que lorsqu'il est fixe.

Indépendamment des ouvertures pratiquées dans les parois du four pour donner passage

aux électrodes, il en existe une dans le prolongement de la sole pour retirer les produits de l'opération, une dans la paroi cylindrique pour charger le four et, enfin, une à la partie supérieure, au centre de la voûte, pour laisser échapper les produits volatils qui se forment par suite des réactions s'effectuant dans la chambre de fusion.

Cette dernière ouverture se continue par une sorte de tuyau cylindrique, disposé dans la partie supérieure et au centre de l'enveloppe métallique extérieure du four. L'extrémité supérieure de ce tuyau débouche, par l'intermédiaire d'un épurateur à sable et d'un tube métallique, dans un barillet, d'où les produits volatils, après avoir barbotté dans l'eau, sont renvoyés dans l'atmosphère ou recueillis si, par leur nature, ils sont susceptibles d'être utilisés.

Grâce à ces dispositifs, l'air atmosphérique ne peut pas circuler librement dans la chambre de fusion, puisqu'aussitôt que la porte servant à charger le four se trouve fermée, les gaz sont à une pression supérieure à celle de l'atmosphère et, par conséquent, s'opposent à toute rentrée d'air. D'autre part, lorsqu'on ouvre la porte pour charger le four, il ne peut s'établir de courant d'air puisque l'ouverture supérieure est fermée par l'eau contenue dans le barillet.

Il est évident qu'un four ainsi construit remplit complètement, dans les limites de la pratique, toutes les conditions précédemment indiquées pour obtenir le meilleur fonctionnement en ce qui concerne les opérations métallurgiques, parce que :

1° Dans la chambre de fusion, il y a toujours une atmosphère parfaitement neutre au point de vue chimique;

2° Dans la transformation de l'énergie électrique en énergie thermique par l'arc électrique, on obtient la plus haute température qu'il soit possible de réaliser pratiquement;

3° Les matières à traiter ne se trouvent pas en contact avec les électrodes et, par conséquent, leur composition ne peut être modifiée par l'absorption de matières étrangères ;

4° Enfin, on obtient dans ce four, d'une manière certaine et pratique, par suite du mouvement de rotation qui lui est imprimé, un brassage continu des matières en fusion, ce qui a pour résultat de faciliter considérablement les réactions chimiques qui doivent s'effectuer, réactions qui sont déjà rendues plus actives et plus rapides par la température très élevée qui régne dans la chambre de fusion, ce qui permet de toujours fonctionner à pleine charge et d'obtenir ainsi le rendement maximum.

Il convient d'ajouter que le four électrique, établi dans les conditions spéciales qui viennent d'être décrites, présente l'avantage d'utiliser la haute température qui y règne, sans qu'il soit nécessaire d'avoir recours à l'opération du réchauffage des matières à traiter. En réalité, en réduisant ce four à sa forme la plus simple, on voit qu'il est constitué par une enceinte fermée, au centre de laquelle une source de chaleur, autre que celle produite par la combustion, produit une température très élevée.

On comprend que, dans ces conditions, la température du four tende à augmenter graduellement et uniformément jusqu'à ce qu'elle atteigne celle de la source de chaleur qui constitue la limite maximum puisque, par suite de la radiation des parois, la température de la chambre de fusion est presque égale au maximum, sans toutefois l'atteindre.

En proportionnant la capacité de la chambre de fusion à la quantité de chaleur que l'on veut y utiliser et en réglant convenablement la charge de manière à obtenir dans le four la chaleur nécessaire, on peut, par conséquent, maintenir dans la chambre la température qui convient à une bonne marche sans qu'il soit nécessaire de réchauffer la masse en fusion.

Dans la pratique des opérations métallurgiques, il n'est pas toujours nécessaire d'avoir recours au brassage de la masse pour activer les réactions. Dans ce cas, le four, tout étant construit d'après les principes énoncés, peut être grandement simplifié en devenant fixe (fig. 4).

Dans ce modèle de four, la sole a une forme rectangulaire, les portes destinées à l'introduction de la charge sont placées sur les deux petits côtés du rectangle, tandis que, sur les grands côtés, se trouvent, sur l'un, l'orifice de coulée et, sur l'autre, l'orifice d'évacuation des scories.

On rend uniforme la répartition de la chaleur dans toute l'étendue de la chambre de fusion en multipliant les centres de radiation.

Ce four fixe convient surtout pour effectuer la fusion réductrice qui précède l'affinage : il présente alors l'avantage de rendre l'opération plus facile et plus économique.

On a vérifié pratiquement, — notamment dans le traitement des minerais de cuivre, — qu'il est nécessaire de maintenir longtemps la masse en fusion pour en séparer les scories que la différence des densités dissémine dans la masse.

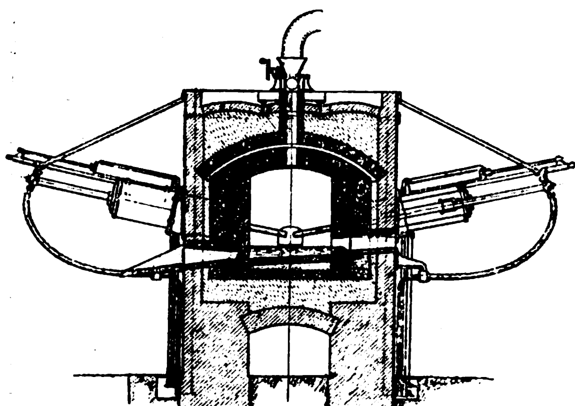


Fig. 4. — Coupe verticale du four fixe Stassano.

Le four fixe modifié permet d'atteindre ce résultat, car la matière fondue, se trouvant dans la partie supérieure de la chambre, là où la température est la plus élevée, peut surnager longtemps dans la chambre de décantation, ce qui permet la séparation complète des scories et du produit utile (cuivre noir dans le cas du cuivre).

En modifiant les fours de ce genre suivant les exigences spéciales des différentes opérations métallurgiques on pourra, évidemment, effectuer ces opérations dans des conditions beaucoup plus avantageuses que ne le permettent les fours chauffés au charbon.

(A suivre.) A. S.

***Four électrique pour le traitement du fer.* — Cohn.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 2 août 1906.

L'auteur décrit un procédé pour chauffer électriquement l'acier que l'on doit travailler ou durcir. Ce four contient un bain de fusion qui rend la température absolument uniforme et soustrait le métal à l'action de l'air ou des gaz. Il fonctionne avec du courant alternatif pour éviter les actions électrolytiques. Les sels métalliques, qui réalisent des conducteurs de la seconde classe, ne laissent pas passer le courant électrique à froid tandis qu'ils présentent une bonne conductibilité à chaud. Les électrodes du four sont en fer : une électrode auxiliaire formée par une barre de fer et par un morceau de charbon établit un court-circuit qui, quand on le rompt, forme un arc, dont la chaleur fond le sel métallique se trouvant à proximité. En déplaçant peu à peu l'électrode auxiliaire, on peut donc échauffer la totalité de ce sel suffisamment pour qu'il devienne conducteur. A ce moment le courant électrique le traverse et le bain fond peu à peu. La température à laquelle ce bain est maintenu dépend de l'intensité du courant qui le traverse : un rhéostat permet de régler convenablement la valeur de celle-ci. On obtient ainsi une température absolument uniforme et de valeur déterminée, et l'on n'a pas de peine à atteindre la valeur de 1300° nécessaire pour le traitement des meilleurs aciers. Il suffit d'étalonner une fois pour toutes le four au moyen d'un pyromètre pour connaître la température correspondant à chaque valeur de l'intensité du courant traversant le bain. Celui-ci est généralement constitué par du chlorure de baryum qui fond à 950° : pour des températures inférieures à 1000°, on emploie un mélange de chlorure de baryum et de chlorure de potassium dans le rapport de 2 à 1 ; la température de fusion de ce mélange est voisine de 670°. La différence de potentiel primaire du courant alternatif à 50 périodes est d'environ 190 volts. Pour l'amorçage du four, on emploie une différence de potentiel d'une cinquantaine de volts : cet amorçage demande environ une demi-heure. Pour des températures de 750° à 1300°, la tension secondaire est de 13 à 18 volts. La consommation d'énergie est à peu près la suivante : 5,4 kilowatts pour 880° ; 8,5 kilowatts pour 1140° et 12,25 kilowatts pour 1300°. Des mesures faites en différents points du bain ont montré que la température de celui-ci est tout à fait uniforme.

E. B.

CHARTRES. — IMPRIMERIE DURAND, RUE FULBERT. *Le Gérant* : J.-B. NOUET.

Tome XLVIII. Samedi 15 Septembre 1906. 13e Année. — N° 37.

L'Éclairage Électrique

REVUE HEBDOMADAIRE DES TRANSFORMATIONS

Electriques — Mécaniques — Thermiques

DE

L'ÉNERGIE

MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASÉ A ROTOR MONOPHASÉ

On sait que les moteurs asynchrones destinés à utiliser du courant monophasé possèdent toujours des rotors polyphasés, triphasés en général. C'est qu'en effet les moteurs à stator et rotor monophasés jouissent de propriétés très différentes de celles des moteurs asynchrones ordinaires et, en particulier, sont susceptibles de tourner à plusieurs vitesses très différentes les unes des autres. Cette propriété est connue depuis assez longtemps et on a essayé de l'utiliser, sans succès semble-t-il. Quoi qu'il en soit, le moteur asynchrone à stator et rotor monophasés n'a pas encore été étudié complètement et, à notre connaissance, on n'a jamais présenté de théorie en expliquant le fonctionnement qui, au moins en apparence, est fort compliqué.

Description du fonctionnement. — Supposons une telle machine mise en mouvement et amenée à la vitesse du synchronisme par un procédé quelconque ; mettons l'enroulement rotorique en court-circuit, l'enroulement statorique aux bornes du réseau et abandonnons le moteur à lui-même. Nous observons qu'il continue à tourner à une vitesse sensiblement égale à celle du synchronisme, mais à des intervalles de temps réguliers et distants de quelques secondes, il fait entendre un violent ronflement. Si des lampes se trouvent branchées sur le réseau à proximité du moteur, leur lumière subit une oscillation brusque à chaque ronflement. Si nous freinons le moteur au moyen d'un brin de courroie enroulé sur la poulie, la vitesse ne paraît pas diminuer, mais les ronflements s'accentuent et augmentent de fréquence au fur et à mesure que croît le couple antagoniste. A un moment donné, les ronflements deviennent désordonnés et la vitesse décroît rapidement ; si on détend alors le frein, la vitesse continue à décroître jusqu'à ce qu'elle soit devenue exactement la moitié

de la vitesse primitive et le moteur continue alors à tourner en régime stable à demi-vitesse et avec les mêmes ronflements que précédemment. Par de nouveaux freinages, exécutés de la même façon, on obtient une marche stable au tiers de la vitesse primitive, puis au quart, au cinquième, etc. — Pratiquement on ne peut obtenir en régime stable toutes les vitesses sous-multiplesde celle du synchronisme, et dans le moteur essayé nous n'avons pu descendre au-dessous du sixième de cette vitesse. A partir de ce moment, on pouvait encore diminuer la vitesse en freinant, mais alors le moteur calait si le couple antagoniste était trop grand, ou bien il reprenait peu à peu la vitesse sixième du synchronisme si ce couple était trop faible. Un autre moteur nous a présenté le même phénomène, mais à la vitesse cinquième du synchronisme.

Théorie du moteur. — La théorie rigoureuse du moteur à stator et rotor monophasés est fort complexe, car les formes des courants statorique et surtout rotorique s'écartent sensiblement de la sinusoïde et l'étude des expressions analytiques qui les représentent est laborieuse et délicate. Sans nous attacher à la rigueur mathématique, nous allons essayer d'expliquer simplement les différents fonctionnements que nous avons mentionnés.

Supposons que nous alimentions le stator au moyen de courant sinusoïdal à la fréquence de ω périodes par seconde, et que la vitesse de rotation du rotor soit $\frac{1}{n}$ fois la vitesse du synchronisme, n étant entier ou non. Supposons enfin que, par un procédé quelconque, nous fassions circuler dans la bobine rotorique un courant sinusoïdal à la fréquence de $\frac{n+1}{n}$ périodes. Par action réciproque des courants statorique et rotorique, il se produira un couple dont la valeur instantanée sera proportionnelle d'une part aux valeurs instantanées du flux dans l'entrefer et du flux rotorique, et d'autre part au sinus de l'angle que forment ces deux flux, c'est-à-dire de la forme

$$Ci = 4h \cos \omega t \cos\left(\frac{n+1}{n}\omega t - \varphi\right) \cos\left(\frac{1}{n}\omega t - \varphi'\right)$$

h, φ et φ' étant des constantes. On peut mettre cette expression sous la forme

$$Ci = h\left[\cos(\varphi - \varphi' + \cos\left(\frac{2}{n}\omega t - \varphi - \varphi'\right) + \cos\left(\frac{2n+2}{n}\omega t - \varphi - \varphi'\right) + \cos 2\,\omega t - \varphi + \varphi')\right].$$

Le couple instantané est donc représenté par la somme de quatre termes, un constant, les autres sinusoïdaux et de fréquences différentes. La valeur moyenne de chacun de ces trois derniers termes pour un nombre suffisamment grand de périodes est nulle et la valeur du couple moyen Cm est égale à

$$Cm = h\cos(\varphi - \varphi').$$

Nous voyons que la machine imaginée est un moteur si φ et φ' sont tels que $\cos(\varphi - \varphi')$ soit positif, moteur dont la vitesse est réglée uniquement par la fréquence d'alimentation du rotor. Supposons maintenant que, tout en maintenant constante la phase φ du courant rotorique, nous fassions croître lentement la phase φ' : la valeur de Cm va varier ; elle croîtra par exemple jusqu'au maximum h puis décroîtra et deviendra négative. Le système cessera alors d'être moteur pour le redevenir lorsque $\cos(\varphi - \varphi')$ atteindra de nouveau des valeurs positives.

Le moteur asynchrone à stator et rotor monophasés est presque identique à la machine que nous venons d'examiner et la fréquence du courant rotorique est aussi $\frac{n+1}{n}$ fois la fréquence du courant d'alimentation. Toutefois, lorsque n varie dans les environs d'un

nombre entier, la fréquence du courant rotorique reste constante, comme nous allons le montrer. Supposons en effet que nous ayons amené en coïncidence les axes des bobines statorique et rotorique, cette dernière étant maintenue immobile, et que nous alimentions le stator au moyen d'un courant sinusoïdal à la fréquence de ω périodes ; le rotor sera alors également parcouru par un courant sinusoïdal et de fréquence ω périodes. Animons alors le rotor d'un mouvement propre, de sens quelconque, mais de façon à ne jamais l'écarter de sa position initiale d'un angle supérieur à $\frac{\pi}{2}$; le courant rotorique n'est plus sinusoïdal, mais sa fréquence reste évidemment égale à ω périodes quelle que soit la vitesse du mouvement imprimé au rotor. Ce courant peut d'ailleurs, à un moment quelconque, être considéré comme la somme de deux courants dont l'un est sinusoïdal et induit statiquement et dont l'autre, induit dynamiquement, dépend de la vitesse du rotor à l'instant considéré. De même lorsque le rotor tourne au $\frac{1}{n}$ synchronisme, n étant voisin du nombre entier n', la fréquence du courant rotorique n'est pas $\frac{n+1}{n}$, mais bien $\frac{n'+1}{n'}$ et elle conserve cette valeur pendant $\frac{1}{n'-n}\frac{1}{2\omega}$ secondes, après quoi le courant rotorique se décale de π et suit les mêmes variations que précédemment.

Nous pouvons maintenant comprendre ce qui se passe dans un moteur à stator et rotor monophasés. Si la vitesse de ce moteur est, à un moment donné, $\frac{1}{n}$ fois celle du synchronisme, n étant voisin du nombre entier n', la fréquence du courant rotorique est $\frac{n'+1}{n'}\omega$ et, comme la vitesse du moteur est intimement liée à la fréquence de ce courant, le moteur tend à tourner au $\frac{1}{n'}$ synchronisme, ce qui explique les différentes stabilités du moteur.

Toutefois si le rotor tournait rigoureusement au $\frac{1}{n'}$ synchronisme, le couple moyen Cm serait nul, car $\varphi-\varphi'$ est égal à $\frac{\pi}{2}$; aussi le rotor glisse-t-il légèrement en vitesse relative. Par suite de ce glissement, il est induit dynamiquement dans le rotor un courant qui change à la fois la phase et la forme du courant rotorique; Cm devient positif et le moteur peut accomplir du travail. La phase φ' variant avec le glissement, à un moment donné Cm s'annule et devient négatif; le moteur freine alors brutalement, puis le rotor et le courant rotorique s'étant chacun décalé en tout de π, le cycle précédant recommence. Ce sont ces freinages brusques qui produisent les ronflements périodiques du moteur et qui, en provoquant un appel de courant considérable dans le stator, produisent les oscillations des lampes sur le réseau. Lorsqu'on freine le moteur sur sa poulie, le courant induit dynamiquement dans le rotor doit être plus considérable, et c'est pourquoi le glissement s'accroît et par suite les ronflements augmentent de fréquence. La vitesse moyenne du rotor diminue donc, mais très légèrement, jusqu'au moment où, le couple antagoniste étant trop considérable, le régime devient instable et le moteur ralentit rapidement. Lorsque la vitesse est devenu suffisamment voisine de $\frac{1}{n'+1}$ du synchronisme, la fréquence du courant rotorique devient exactement $\frac{n'+2}{n'+1}$ fois celle du courant statorique et on retombe sur un fonctionnement stable.

Le raisonnement que nous venons de faire s'applique aussi au cas où le rotor tourne n'' fois plus vite qu'au synchronisme et le moteur aura des régimes de stabilité pour toutes les vitesses multiples entiers du synchronisme.

Enfin on voit facilement qu'une telle machine, entraînée par un moteur quelconque et empruntant du courant magnétisant à un réseau, pourra théoriquement fonctionner en génératrice asynchrone à toutes les vitesses multiples ou sous-multiples entiers du synchronisme.

La théorie simple que nous venons d'exposer explique bien les propriétés singulières de la machine asynchrone à stator et rotor monophasés. Elle permet de plus de prédéterminer la forme des courants rotorique et statorique pour les différents régimes stables, courants qui satisfont aux remarques suivantes :

Courant rotorique. — Le moteur tournant au $\frac{1}{n'}$, synchronisme il y a deux cas à examiner :

1° n' est pair. Au bout d'un demi-tour du rotor, le flux dans l'entrefer reprend la même valeur et par suite le courant rotorique passe par les mêmes valeurs prises en sens inverse. Le train d'ondes se composera de n' ondes dont les $\frac{n'}{2}$ dernières se déduiront des $\frac{n'}{2}$ premières en les changeant de signe;

2° n' est impair. Au bout d'un demi-tour le flux reprend les mêmes valeurs mais en sens inverse et, comme la bobine rotorique s'est inversée, le courant rotorique repasse par les mêmes valeurs et dans le même sens ; le train d'ondes ne comporte que n' demi-périodes.

Quelle que soit la parité de n', après chaque ronflement le rotor se décale d'une demi-période et le courant rotorique s'inverse.

Courant statorique. — 1° n' est pair. Pour un observateur immobile sur le stator et regardant le rotor, au bout d'un demi-tour le courant rotorique repasse par la même valeur et dans le même sens, donc le courant statorique repassera par la même valeur et le train d'ondes de ce courant ne comportera que $\frac{n'}{2}$ périodes ;

2° n' est impair. Au bout d'un demi-tour les courants statorique et rotorique se sont inversés pour l'observateur sans changer de valeur absolue, donc le train comprendra $2n'$ demi-périodes dont les n' dernières se déduiront des n' premières en les changeant de signe.

Toutes ces conclusions ont été vérifiées en faisant l'essai d'un moteur et relevant les courbes de courant de la façon suivante :

Dispositif expérimental. — Le courant monophasé nécessaire aux expériences était fourni, sous une tension de 120 volts, et à la fréquence de 50 périodes par seconde, par un alternateur à faible chute de tension. Le moteur essayé, provenant des ateliers d'Oerlikon, était bipolaire à stator monophasé avec une phase auxiliaire de démarrage que l'on n'utilisait pas. L'enroulement rotorique était triphasé en étoile avec bagues et rhéostat extérieur. Un oscillographe double de Blondel avait une de ses bobines montée en dérivation sur la ligne ; dans l'autre bobine on faisait passer le courant statorique ou rotorique suivant que l'on voulait étudier l'un ou l'autre. Ces courants atteignant des intensités dangereuses pour la bobine, on la shuntait au moyen d'un gros fil de maillechort choisi convenablement pour pouvoir être utilisé pendant toute la durée des essais sans être modifié. Le moteur était démarré avec rotor triphasé par le procédé Riccardo Arno puis, après avoir mis l'enroulement rotorique en court-circuit, on coupait l'une des phases de cet enroulement au moyen d'un interrupteur et on constituait ainsi un enroulement monophasé. Immédiatement les ron-

flements se faisaient entendre ; par des freinages successifs, on passait à la vitesse à étudier et on photographiait les courbes données par l'oscillographe. Toutes ces photographies ont été prises le moteur tournant à vide.

Marche avec rotor triphasé. — Nous donnons à titre de comparaison les courbes de courants dans la marche avec rotor triphasé. Nous désignerons par V les volts aux bornes, par I_1 le courant statorique, par I_2 le courant rotorique. Pour ce régime, ces données ont les valeurs suivantes : $V = 122$, $I_1 = 32$, $I_2 = 25$. La figure 1 représente le courant statorique, la figure 2, le courant dans une des branches de l'enroulement rotorique, courant qui, comme on le sait, est de fréquence double du courant statorique et glisse lentement par rapport à la tension.

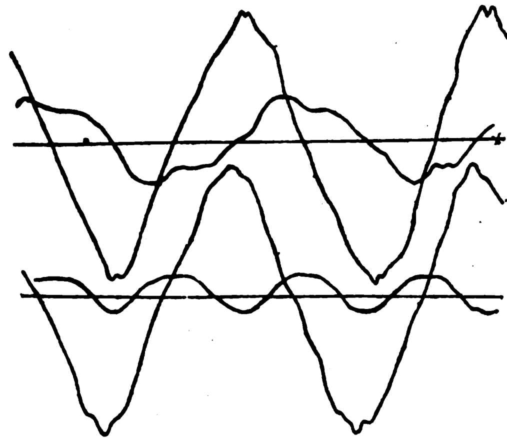


Fig. 1 et 2.

Marche au synchronisme. — $V = 122$, $I_1 = 32$, $I_2 = 25$. La figure 3 représente le courant statorique, la figure 4, le courant rotorique. Comme l'indique la théorie, ce dernier est la somme d'un courant induit statiquement et de fréquence double du courant statorique et d'un courant induit dynamiquement, qui est un courant pulsatoire et toujours de même signe (positif sur la figure 4). Le moteur se comporte comme un moteur synchrone alimenté au secondaire par du courant continu ou mieux pulsatoire et toujours de même signe; toutefois, les ondes de courant rotorique ne sont pas fixes mais glissent lentement. Lorsqu'un ronflement se produit, le rotor se décale en arrière d'un demi-tour, le courant s'inverse dans le rotor et sa courbe représentative devient la symétrique de celle de la figure par rapport à l'axe des temps.

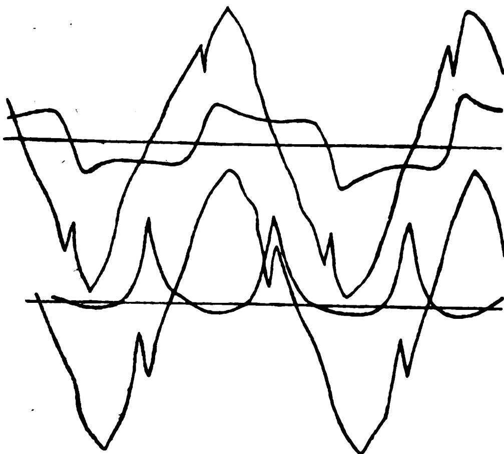


Fig. 3 et 4.

Marche au $\frac{1}{2}$ synchronisme. — $V = 120$, $I_1 = 50$, $I_2 = 40$. Le courant statorique (fig. 5) ne présente qu'une onde, le courant rotorique (fig. 6) en a deux qui sont égales et de signe contraire. En regardant ce dernier courant sur le verre dépoli de l'oscillographe, on n'a pas le même aspect qu'en le photographiant. En effet, on sait que, dans l'appareil de M. Blondel, deux périodes sont tracées en trait lumineux, tandis que la troisième est éclipsée pour le retour du miroir, la quatrième et la cinquième sont tracées et ainsi de suite. On voit que, par suite de la persistance lumineuse sur la rétine, les ondes paires et impaires se superposent et le courant rotorique se présente sous une forme symétrique donnant à peu près l'impression d'une corde vibrante (fig. 7).

Marche au $\frac{1}{3}$ synchronisme. — $V = 117$, $I_1 = 60$, $I_2 = 50$.

Le courant statorique (fig. 8) possède trois ondes différentes formant un train composé de

deux parties égales et de signe contraire. En regardant l'oscillographe, on ne voit que deux de ces ondes ; la troisième est éclipsée et apparaît après un ronflement tandis que la première s'éclipse à son tour. Le phénomène paraît donc être à 3 temps séparés chacun par un ronflement. Le courant rotorique (fig. 9) possède à un moment donné 3 ondes, 1, 2, 3, formant un train composé de deux parties identiques puis après un ronflement 3 ondes 1′ 2′ 3′ égales aux premières mais de signe contraire. En regardant l'oscillographe, on ne voit d'abord que 1 et 2 puis après un ronflement 2′ et 3′ puis 3 et 1, 1′ et 2′, 2 et 3, 3′ et 1′, ce qui donne six aspects différents.

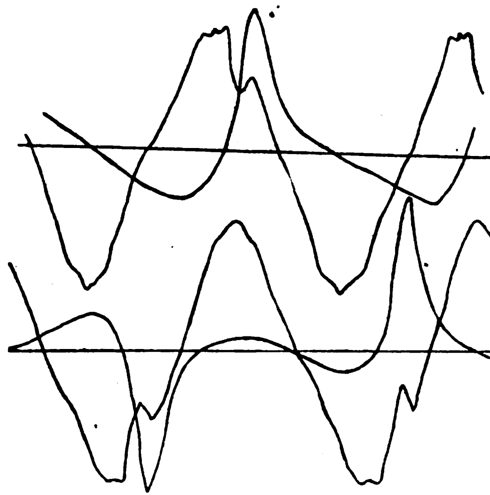


Fig. 5 et 6.

Marche au $\frac{1}{4}$ synchronisme. — $V = 116$, $I_1 = 68$, $I_2 = 60$.

Le courant statorique (fig. 10) ne comprend que 2 ondes. Le courant rotorique (fig. 11) possède 4 ondes successives ; les ondes 3 et 4 sont égales et de signe contraire aux ondes 1 et 2. En regardant l'oscillographe, on voit se superposer toutes les ondes, car sont tracées d'abord 1, 2 puis 4,1, puis 3, 4, puis 2,3 ; on a donc l'aspect de deux cordes vibrant sur le même axe.

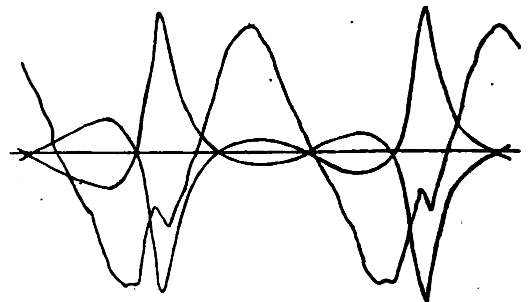


Fig. 7.

Marche au $\frac{1}{5}$ synchronisme. — $V = 115$, $I_1 = 71$, $I_2 = 63$.

Le courant statorique (fig. 12) se compose de 5 périodes formant deux demi-trains égaux et de signe contraire. Le courant rotorique (fig. 13) forme un train composé de deux parties égales et ne portant que sur cinq demi-périodes.

Marche au $\frac{1}{6}$ synchronisme. — $V = 115$, $I_1 = 74$, $I_2 = 65$.

Le courant statorique (fig. 14) se compose de trois ondes et, vu à l'oscillographe, présente les mêmes alternances d'aspect que le courant statorique au $\frac{1}{3}$ synchronisme. Le courant rotorique (fig. 15) se compose de six périodes deux à deux égales et de signe contraire. En regardant l'oscillographe, on voit superposées les périodes 1 et 4 ainsi que 2 et 5 ce qui donne l'aspect d'une corde vibrante (fig. 16). On a ainsi trois aspects différents séparés l'un de l'autre par un ronflement.

Marche sans glissement. — Avec le moteur essayé, la marche au $\frac{1}{6}$ synchronisme présentait une particularité. En effet à tous les autres régimes il y avait un certain glissement en arrière du rotor et, en observant à l'oscillographe les ondes de courant rotorique, on les voyait glisser lentement ; au contraire, au $\frac{1}{6}$ synchronisme, les ondes de courant ne glissent plus et semblent être absolument fixes. Les ronflements chroniques disparaissent également et sont remplacés par un ronflement peu intense mais uniforme. Au $\frac{1}{6}$ synchronisme le

moteur est donc synchrone. Cette propriété, qui semble à première vue singulière, n'est pas particulière au $\frac{1}{6}$ synchronisme, car un autre moteur essayé par nous a présenté le même phénomène au $\frac{1}{5}$ synchronisme, moteur avec lequel nous n'avons d'ailleurs pas pu obtenir de marche stable au $\frac{1}{6}$ synchronisme.

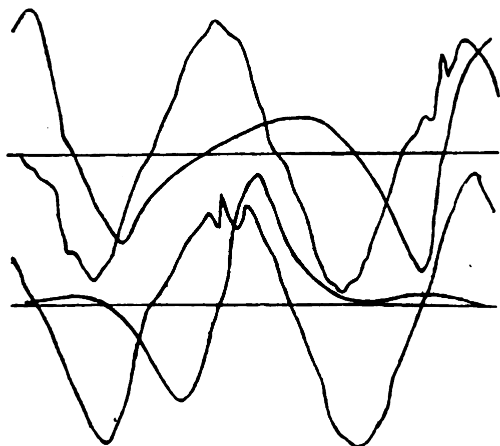


Fig. 8 et 9.

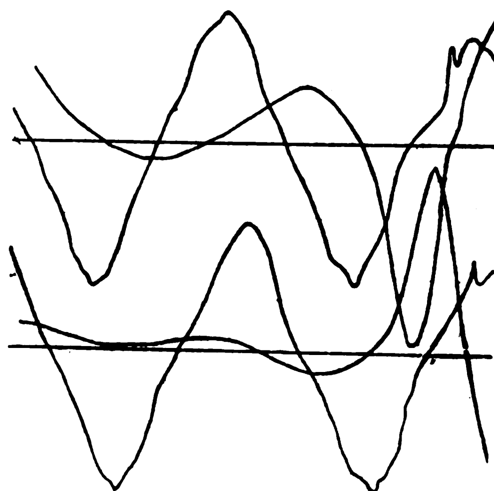


Fig. 10 et 11.

L'explication de cette absence de glissement est à notre avis la suivante : si nous nous reportons à la valeur instantanée du couple du moteur

$$Ci = h\left[\cos(\varphi - \varphi') + \cos\left(\frac{2}{n}\omega t - \varphi - \varphi'\right) + \cos\left(\frac{2n+2}{n}\omega t - \varphi - \varphi'\right) + \cos(2\omega t - \varphi + \varphi'),\right.$$

nous voyons que, lorsque n est suffisamment grand, le terme à la fréquence $\frac{2}{n}$ de celle du courant statorique se trouve être à longue période, qu'il conserve le même signe pendant un demi-tour du rotor et que sa valeur maxima est indépendante des phases φ et φ'. Si le rotor tourne au $\frac{1}{n}$ synchronisme exact, il va prendre, sous l'action de ce couple alternatif, un mouvement de balancement de part et d'autre de sa position moyenne. Or lorsque le moteur tourne uniformément au $\frac{1}{n}$ synchronisme exact, le couple moyen $h\cos(\varphi - \varphi')$ est nul ; pour que le rotor puisse à un moment donné être entraîné à glisser en avant, il faut que le couple alternatif soit supérieur au couple antagoniste, en l'espèce le couple des pertes mécaniques qui diminue lorsque n augmente. Si cette condition est vérifiée, le rotor peut prendre un mouvement oscillatoire autour de sa position moyenne, mouvement grâce auquel circule dans l'enroulement rotorique un courant induit dynamiquement : φ et φ' sont modifiés de telle sorte que la valeur moyenne de $\cos(\varphi - \varphi')$ soit différente de zéro et le couple moyen reste positif,

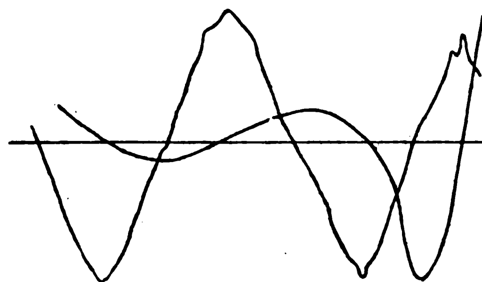


Fig. 12.

Pour que ce régime synchrone soit possible, il faut que la valeur du couple antagoniste soit faible et en effet, si l'on augmente par freinage sur la poulie, on observe que le moteur se met à glisser constamment en arrière en même temps que les ronflements périodiques reprennent exactement comme pour les autres régimes.

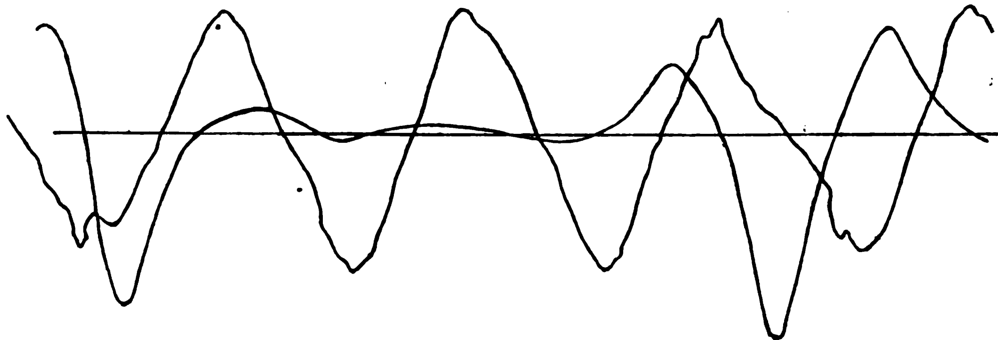


Fig. 13.

Nous voyons aussi pourquoi on ne peut obtenir à vide de régime stable au $\frac{1}{n}$ synchronisme n étant supérieur à 5 ou 6. C'est que le couple pulsatoire a une valeur assez grande

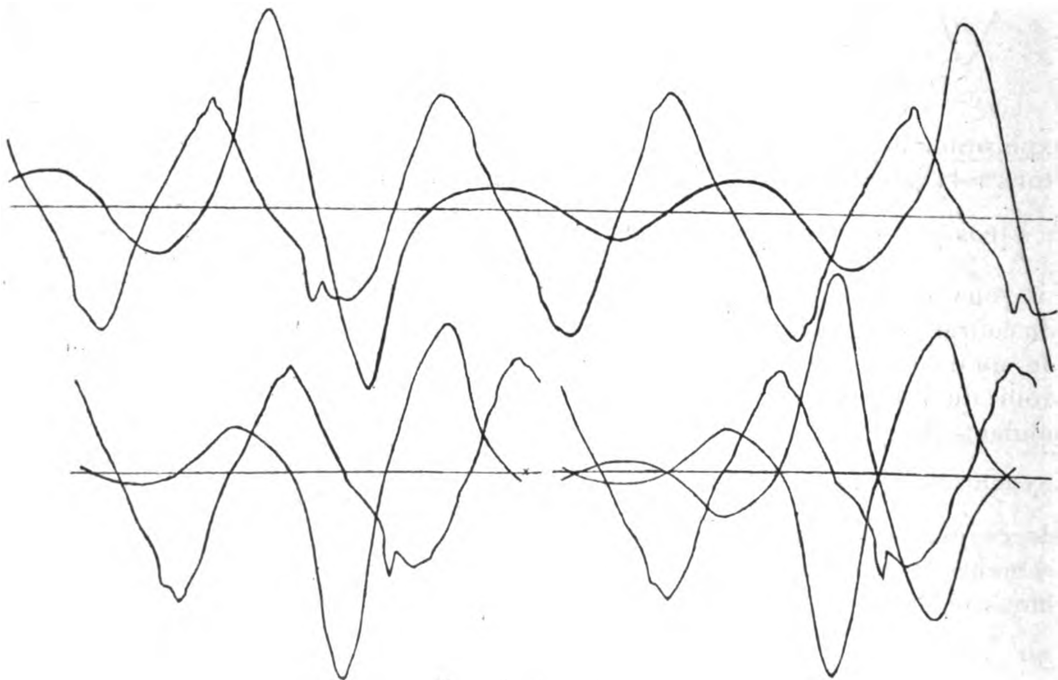


Fig. 14, 15 et 16.

et une fréquence assez faible pour donner au rotor l'impulsion nécessaire pour dépasser le régime stable auquel il se trouve et atteindre le régime stable immédiatement au-dessus. Pour que le moteur reste accroché dans ces conditions, il faudrait augmenter la valeur du couple antagoniste et l'amener à une valeur convenable.

Conclusions. — Le moteur asynchrone à stator et rotor monophasés présente la propriété fort séduisante de pouvoir tourner à des vitesses très différentes les unes des autres, mais

il possède des inconvénients graves qui paraissent devoir lui interdire tout emploi industriel. Les principaux de ces inconvénients sont : usure rapide de la machine et des paliers, échauffement intense, couples peu élevés et oscillations dans la lumière du réseau. On peut voir sur les photographies les modifications profondes apportées à la courbe de tension par le moteur, modifications qui se manifestent sous formes de dents profondes qui se déplacent sur la courbe en suivant le glissement du rotor. En résumé, le moteur à stator et rotor monophasés ne paraît pas être susceptible d'utilisation, mais il constitue une machine éminemment intéressante au point de vue de l'électrotechnique théorique.

En terminant cet exposé, qu'il me soit permis de remercier mon savant professeur et ami M. A. Mauduit, maître de conférences à la Faculté de Nancy, qui m'a aidé de ses conseils éclairés et à qui je dois d'avoir pu relever, sur l'oscillographe Blondel de l'Institut Électrotechnique de Nancy, les courbes contenues dans cette étude.

A. Courtot.

LES USINES ET INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES DE SAINT-GALL

Les installations électriques de la ville Saint-Gall, chef-lieu du canton de Saint-Gall, ont présenté un développement et un accroissement rapides, et sont maintenant parmi les plus importantes installations municipales de la Suisse.

Les études préliminaires ont été faites avec une grande prévoyance et de telle façon que les agrandissements et extensions pussent être effectués dans l'avenir avec facilité. Dès 1886. une petite installation d'éclairage électrique fut établie dans l'usine à gaz et à l'hôpital. Après différentes propositions, la ville acheta en 1889 la concession de la force hydraulique disponible sur le cours de la Goldach. La puissance électrique disponible de l'installation de l'usine à gaz fut augmentée par l'adjonction d'un moteur à gaz de 25 chevaux entraînant une dynamo à courant continu, et d'une forte batterie d'accumulateurs ; cette petite usine génératrice pouvait alimenter, d'une façon continue, 500 lampes à incandescence de 16 bougies.

En 1895, le propriétaire d'une brasserie de Saint-Gall établit sur la Sitter, à Erlenholz, une usine hydro-électrique à courants triphasés et rétrocéda à la ville 60 chevaux électriques. On adjoignit donc à l'installation de l'usine à gaz un moteur triphasé entraînant une dynamo génératrice à courant continu. L'installation put alimenter alors 2 000 lampes à incandescence de 16 bougies. La même année, la ville décida l'installation d'un tramway électrique et mit au concours un projet d'usine génératrice qui, outre les 60 chevaux fournis par l'usine d'Erlenholz et les deux moteurs à gaz de 25 chevaux, devait comprendre de nouveaux moteurs à gaz capables de fonctionner avec du gaz Dawson. La distribution devait être faite par courant continu à trois fils. La tension devait être de 2×125 volts pour l'éclairage (au départ des feeders) et 500 volts pour la traction. Les chutes de tension admises étaient de 2×12 volts dans les feeders, 2×2 volts dans les conducteurs de distribution, et 50 volts dans les lignes de tramways. A la suite de ce concours, l'installation fut confiée aux Ateliers d'Oerlikon.

Cette installation, mise en service au début de 1897, fut bientôt insuffisante pour répondre aux demandes, toujours croissantes, d'énergie électrique. On décida d'une part d'utiliser l'énergie hydraulique de la Goldach, et, d'autre part, de passer un traité avec le Kubelwerk,

usine hydro-électrique établie aux environs de Saint-Gall, pour la fourniture de courant électrique à la ville. Les moteurs à gaz de l'ancienne usine devaient servir de réserve en cas d'avarie ou de manque d'eau à l'usine de Goldach ou du Kubelwerk. L'énergie électrique fournie par les deux stations hydro-électrique est convertie en courant continu par des groupes placés les uns dans l'ancienne usine génératrice principale, les autres dans une sous-station établie dans la partie ouest de la ville.

Usine de la Goldach. — La Goldach prend sa source dans le canton d'Appenzell et se jette dans le lac de Constance : son débit est extrêmement variable et la construction d'un réservoir destiné à augmenter le débit lors des basses eaux aurait entraîné des dépenses importantes. Dans ces conditions, la puissance hydraulique disponible varie entre 500 et 100 chevaux.

Le barrage est à trois kilomètres de l'usine hydro-électrique : il est représenté par la figure 1. Deux vannes en fer sont prévues pour le trop-plein, et une pour l'ouverture du barrage. Celui-ci est en pierres et rochers pris dans le lit de la Goldach et maçonnés avec de la chaux hydraulique.

La longueur du canal qui alimente l'usine est de 2 230 mètres : sa section est de 3 mètres carrés environ. Deux conduites de trop plein sont branchées sur le canal et retournent à la Goldach. A l'extrémité du canal est ménagé un bassin d'où part la conduite forcée. Celle-ci a 1 200 mètres de longueur et se compose de tuyaux en fonte de 60 centimètres de diamètre et de 4 mètres de longueur : cette conduite est enterrée d'au moins 60 centimètres dans le sol. Les parois ont 12, 15 et 18 millimètres d'épaisseur, suivant la zone de la conduite à laquelle elles appartiennent. La hauteur de chute efficace utilisable est de $134^{m},50$.

L'usine hydro-électrique elle-même est distante de $5^{km},1$ de la ville de Saint-Gall. La salle des machines a été établie pour trois groupes principaux et un petit groupe. Deux groupes principaux seulement sont en fonctionnement (fig. 2).

La conduite forcée pénètre dans le bâtiment par un tuyau en fer forgé de 60 centimètres de diamètre dont les parois ont 8 millimètres d'épaisseur. Cette conduite est munie d'un canal de compensation avec vanne d'écoulement pour la conduite de trop-plein et d'une soupape manœuvrée par engrenage.

Les deux turbines à haute pression, établies par Bell et Cie, sont calculées par une chute de 127 mètres et un débit de 158 litres par seconde. Leur puissance est de 200 chevaux à la vitesse de rotation de 530 tours par minute. Leur rendement est de 75 % à pleine charge et 72 % à demi-charge : elles sont formées de roues à augets. Une turbine de 3 chevaux à 1 650 tours par minute entraîne une dynamo génératrice servant à l'éclairage.

Les turbines principales entraînent, par l'intermédiaire d'accouplements élastiques et isolants, des alternateurs Oerlikon à fer tournant : ceux-ci produisent des courants triphasés à 3 600 volts et 53 périodes. Chaque moitié d'induit porte 36 encoches avec 18 bobines. Chaque bobine est formée de 38 spires de fil de $3^{mm},6$. Le rotor porte 2×6 pôles : la bobine inductrice comprend 550 tours de fil de $5^{mm},5$. Les excitatrices sont montées en bout d'arbre des générateurs, comme on le voit sur la figure 2.

Les courants triphasés produits par les alternateurs sont amenés au tableau de distribution par des conducteurs en cuivre disposés dans des caniveaux en béton. Le tableau porte les différents appareils de réglage, de mesure et de sécurité. Les parafoudres sont montés sur la façade du bâtiment.

Station centrale de Saint-Gall. — Cette station centrale comprend le bâtiment des machines, le bâtiment des ateliers et des accumulateurs, les remises des voitures des tramways et un bâtiment contenant le magasin et l'atelier de bobinage.

La salle des machines contient six groupes de machines.

Le premier groupe comprend un moteur à gaz monocylindrique de 60 chevaux accouplé par courroie à un ensemble de machines composé d'un moteur triphasé de 60 chevaux

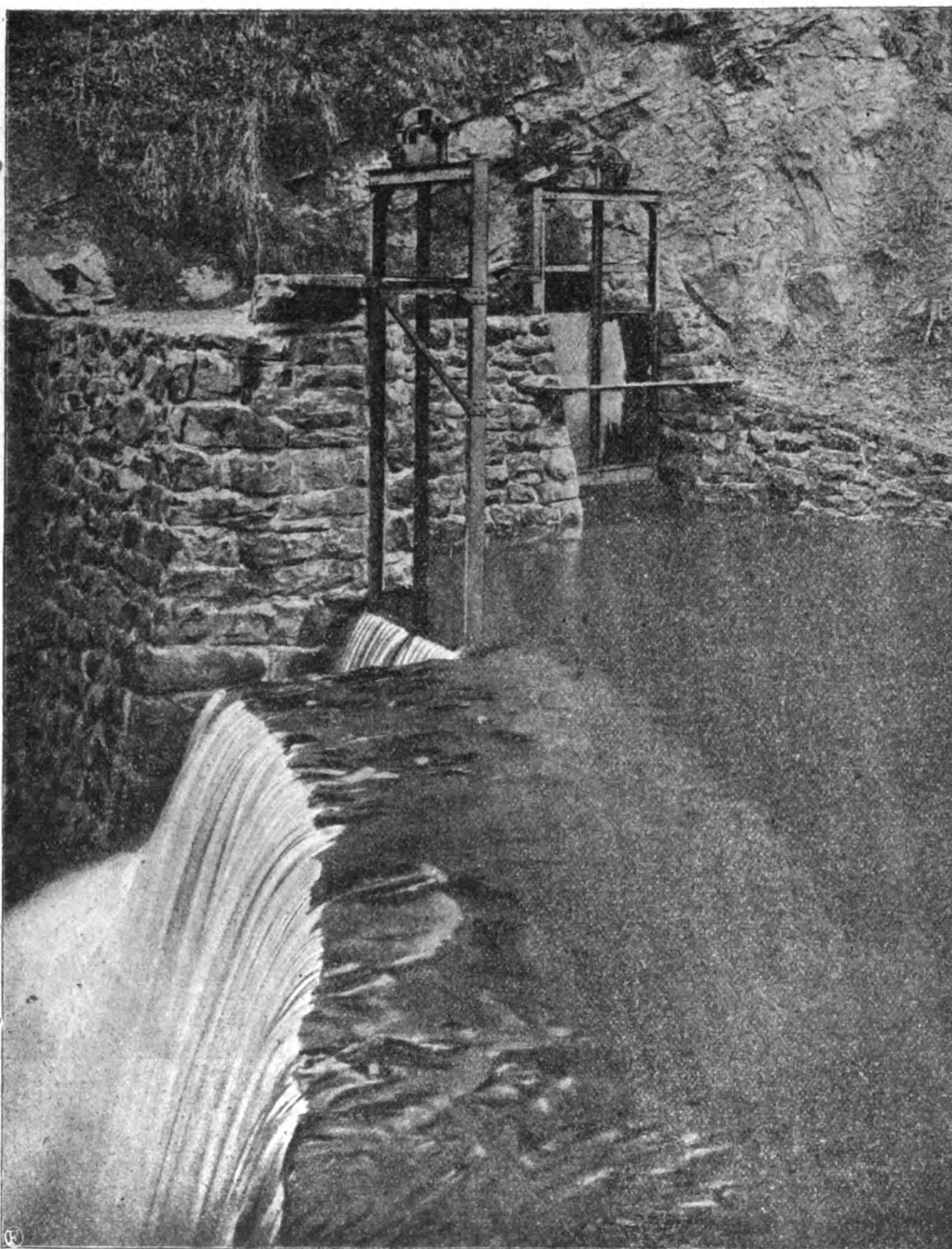


Fig. 1. — Vanne d'entrée dans le canal de l'usine hydraulique de la Goldach.

accouplé directement à deux dynamos à courant continu de 60 chevaux placées de part et d'autre. Les accouplements des machines entre elles et avec la poulie de commande permettent de relier l'une des dynamos au moteur triphasé et l'autre au moteur à gaz, ou bien

les deux dynamos au moteur triphasé seul. Ce moteur triphasé est alimenté par des courants venant de la station centrale d'Erlenholz sur la Sitter.

Le deuxième groupe comprend deux moteurs à gaz monocylindriques de 30 chevaux, un moteur triphasé de 60 chevaux, et deux dynamos génératrices de 30 chevaux. Les moteurs à gaz commandent par courroie soit les dynamos, soit le moteur triphasé fonctionnant comme

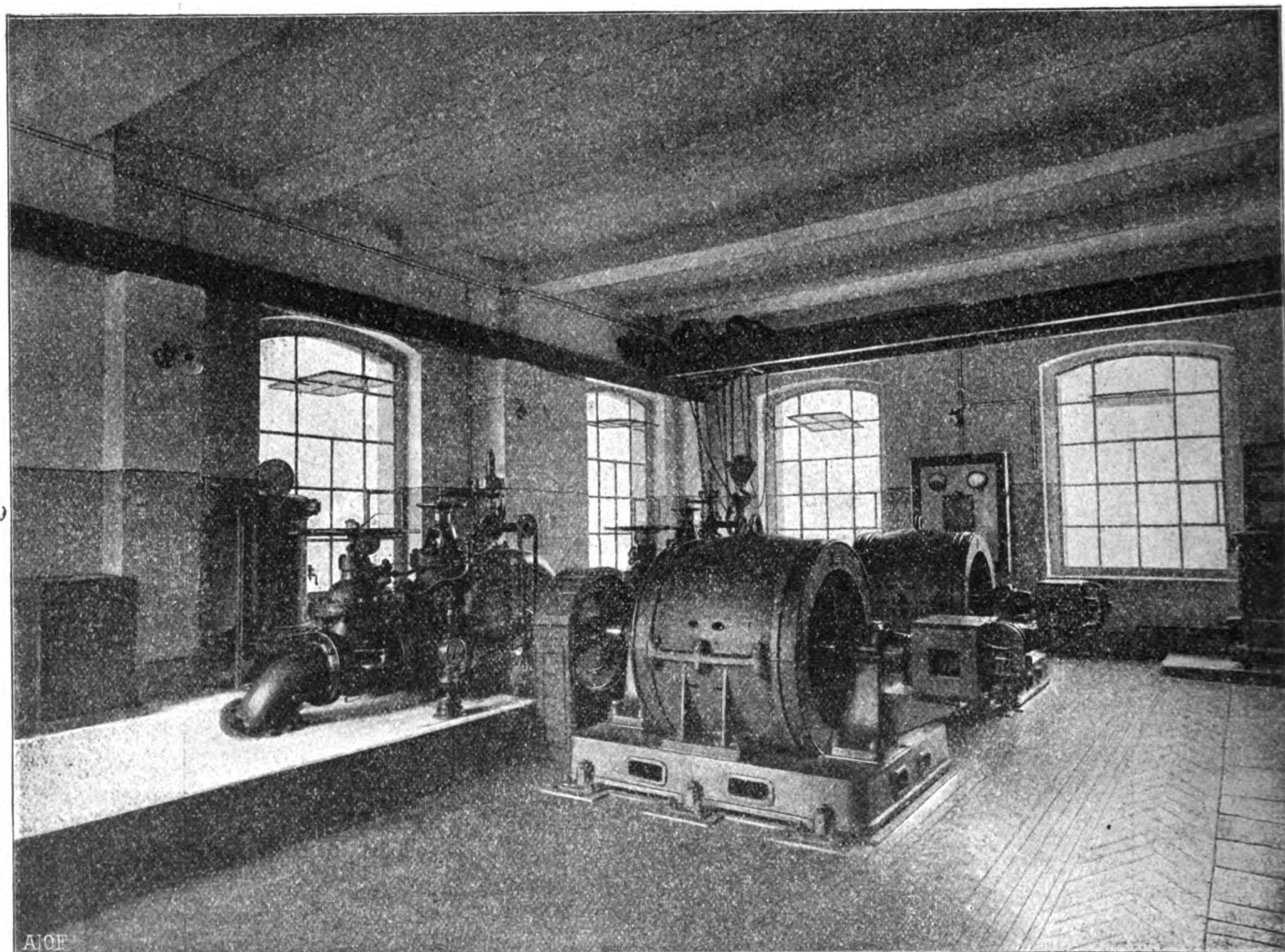


Fig. 2. — Intérieur de la station centrale de la Goldach.

alternateur. On peut aussi commander isolément les dynamos par le moteur à gaz et par le moteur triphasé. Ce moteur est alimenté par l'usine de la Goldach ou par le Kubelwerk.

Le troisième groupe comprend un moteur à gaz monocylindrique de 100 chevaux, un moteur triphasé de même puissance, et une dynamo à courant continu de même puissance. Le moteur triphasé, alimenté par l'usine de la Goldach ou celle de Kubel, est directement accouplé à la dynamo : le moteur à gaz peut être accouplé au moyen d'une courroie.

Le quatrième groupe comprend un moteur à gaz à deux cylindres de 150 chevaux commandant par courroie une dynamo génératrice. Tous ces différents groupes sont nettement visibles sur la figure 3.

Le cinquième groupe est composé d'un moteur triphasé de 200 chevaux commandant deux dynamos génératrices de 100 chevaux directement accouplées avec lui.

Le sixième groupe est formé d'un moteur triphasé de 250 chevaux entrainant directement deux dynamos génératrices de 125 chevaux.

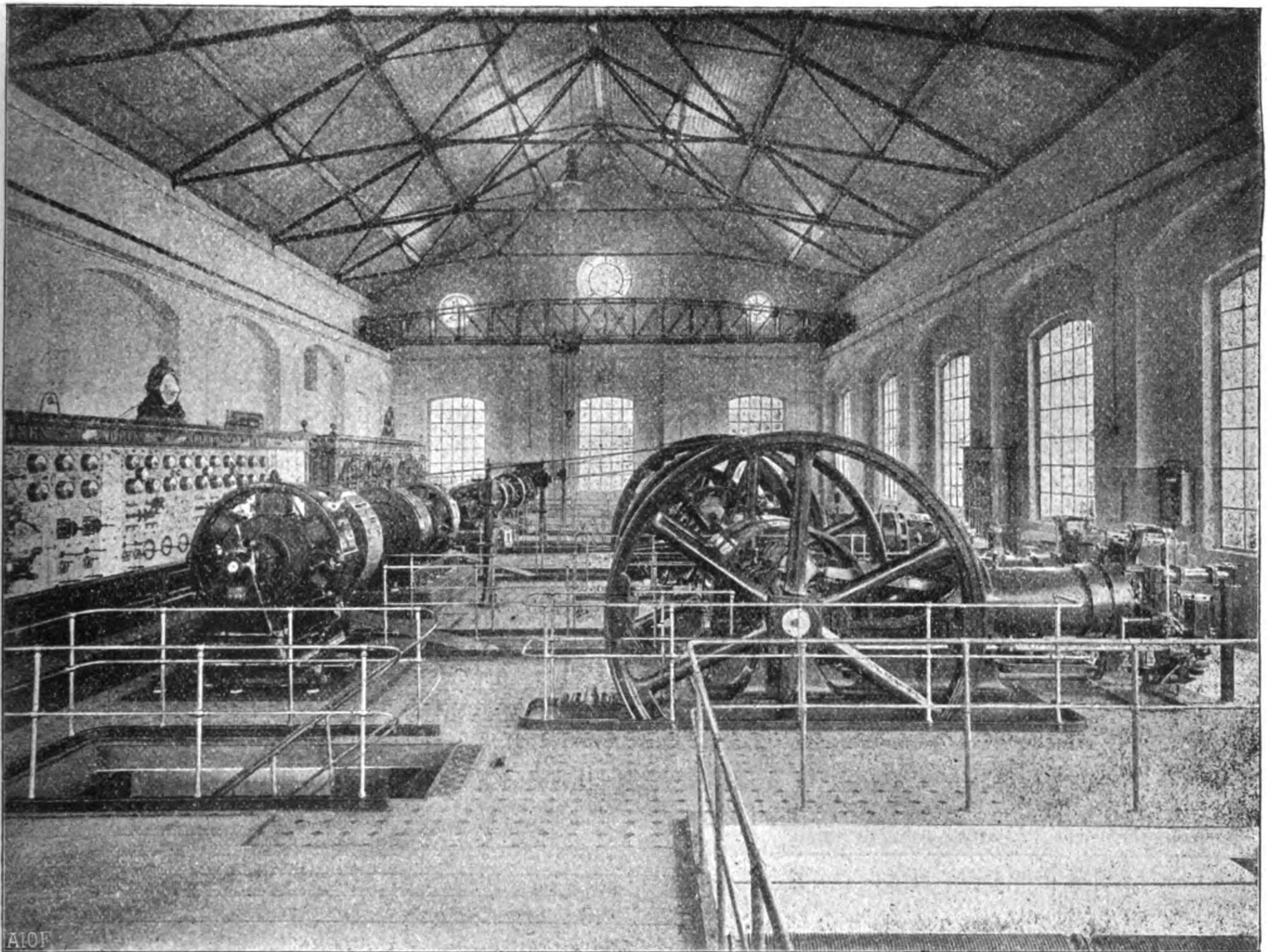


Fig. 3. — Intérieur de la station centrale de Saint-Gall.

Les deux moteurs triphasés du cinquième et du sixième groupe sont alimentés par les courants venant de l'usine de la Goldach ou du Kubelwerk. Ces groupes sont visibles sur la figure 4.

Toutes les dynamos génératrices à courant continu, sauf celle du deuxième groupe, travaillent sur l'un quelconque des réseaux d'éclairage, de force motrice ou de tramways. Les génératrices du deuxième groupe sont branchées chacune entre le conducteur neutre et l'un des conducteurs extrêmes du réseau : elles servent à l'éclairage et au chargement des batteries.

Un survolteur, comprenant un moteur à 500 volts et une dynamo shunt, est placé dans le sous-sol ; il sert pour la charge de la batterie d'accumulateurs.

Les différents moteurs à gaz sont du type Deutz : ils sont alimentés par le gaz d'éclairage

que produit l'usine. C'est exprès que l'on a choisi pour eux des puissances variées, de façon à donner à l'usine plus de souplesse. Le démarrage de ces moteurs est effectué au moyen d'une pompe à main, d'une soupape d'admission, et d'un taquet arrêtoir en prise avec la couronne du volant. On envoie, avec la pompe, une certaine quantité de gaz et d'air dans le cylindre et on allume ce mélange sous pression au moyen d'une étincelle de charge. L'explosion produite lance le volant : le taquet arrêtoir empêche le départ de celui-ci sous la seule action du mélange sous pression envoyé par la pompe ; il est libre au moment de l'explosion. Les moteurs à gaz sont à quatre temps, l'allumage est assuré par des tubes en porcelaine incandescents.

Les machines électriques, établies par les Ateliers d'Oerlikon, sont de différents types.

Le moteur triphasé du groupe I est octopolaire ; il est construit pour une tension de 1560 volts à 53 périodes et 725 tours par minute. Le diamètre d'alésage est de 600 millimètres et le stator a 72 encoches; chaque encoche contient 16 fils de 3^{mm},1 sur 3^{mm},7 Le diamètre du rotor est de 598 millimètres ; il porte 160 encoches avec conducteurs de 6 millimètres sur 6^{mm},6. Les dynamos à courant continu de 40 kilowatts, accouplées au moteur précédent, produisent chacune 73 ampères sous 550 volts. Leurs induits ont un diamètre de 470 millimètres et une longueur de 320 millimètres; ils portent 136 encoches de 5^{mm},2 sur 23^{mm},5. Chaque encoche contient 6 spires de fil de 3,0 sur 3,6. L'induit est enroulé en anneau. Le collecteur se compose de 136 lames de cuivre avec feuilles de mica de 0^{mm},8 d'épaisseur. Le diamètre d'alésage des pôles est de 480 millimètres. Les 4 bobines sont en série ; elles sont formées chacune de 5 800 spires de fil de 1,1 sur 1,5.

Le moteur triphasé du groupe II est construit pour une tension de 3 300 volts et 53 périodes par seconde. Il fait 770 tours par minute et sa construction est analogue à celle du moteur précédent. Les dynamos à courant continu, qui lui sont accouplées, produisent du courant continu sous 130 volts. Les induits ont chacun 126 encoches de 5 sur 18 millimètres ; ils sont bobinés en parallèle. Le pas d'enroulement est 31. Le diamètre de l'induit est de 394 millimètres et le diamètre d'alésage 404 millimètres. Les 4 bobines inductrices sont en série et se composent chacune de 950 spires de fil de 2^{mm},2 sur 2^{mm},7.

Le moteur triphasé du groupe III a 12 pôles ; il n'a ni bagues de prise de courant, ni dispositif de mise en court-circuit ; il fait 520 tours par minute et fonctionne sous une tension de 3 300 volts et 53 périodes par seconde. Le stator a un diamètre d'alésage de 900 millimètres ; il porte 144 encoches contenant chacune 14 conducteurs de fil de 3^{mm},2 sur 3^{mm},8 Le rotor a un diamètre extérieur de 898^{mm},5 ; il porte 180 encoches pour un conducteur composé de 6 fils nus parallèles, de 4^{mm},2 de diamètre. La dynamo à courant continu du groupe IV produit une tension de 2×275 volts. L'induit a une longueur de 380 millimètres et un diamètre de 854 millimètres; il porte 220 encoches de 6 sur 23 millimètres avec un total de 440 conducteurs nus de 20 sur 1^{mm},5. Chacun des deux collecteurs a 110 lames. L'induit est bobiné en série avec un pas en avant de 37. Le diamètre d'alésage des pôles est de 870 millimètres. Les 6 bobines inductrices sont en série ; elles ont chacune 944 spires de fil de 2^{mm},6 sur 3 millimètres.

Le moteur triphasé appartenant au groupe V a 14 pôles ; il n'a ni bagues de prise de courant, ni dispositif de mise en court-circuit ; il fait 445 tours par minute et fonctionne sous une tension de 3 300 volts à 53 périodes par seconde. Le stator a un diamètre d'alésage de 1 300 millimètres et porte 168 encoches contenant chacune 12 conducteurs de fil de 4^{mm},2 sur 4^{mm},8. Le rotor a un diamètre extérieur de 1298^{mm},5 et porte 210 encoches ; chacune renferme un conducteur composé de 16 fils nus parallèles de 3^{mm},4 de diamètre. Les deux dynamos à courant continu accouplées à ce moteur ont une tension de 275 volts. Leurs induits ont un

diamètre de 745 millimètres, une longueur de 330 millimètres et 239 encoches de 4^{mm},8 sur 2^{mm},5. Chaque encoche contient deux barres de cuivre nu superposées, de 2^{mm},2 sur 10 millimètres et 3^{mm},2 sur 11 millimètres. Les induits sont bobinés en série-parallèle avec un pas d'enroulement égal à 79. Les collecteurs se composent chacun de 239 lames avec feuilles de mica de 0^{mm},6 d'épaisseur. Les pièces polaires ont un diamètre d'alésage de 761 millimètres.



Fig. 4. — Intérieur de la station centrale de Saint-Gall.

Les 6 bobines inductrices sont en série ; elles ont chacune 2 100 spires de fil de 2 millimètres sur 2^{mm},4.

Le moteur triphasé appartenant au groupe VI présente la même construction que le précédent. Les conducteurs du rotor sont composés de 9 brins parallèles de fil de cuivre nu de 4^{mm},8 de diamètre. La vitesse de rotation est de 450 tours par minute. Les dynamos à courant continu, qui sont accouplées avec lui débitent sous 275 volts. Les induits présentent les mêmes dimensions que ceux des dynamos du groupe précédent ; ils ont chacun 146 encoches de 7^{mm},2 sur 35 millimètres ; chacune d'elles contient 2 moitiés de bobine à 1 brin ; chaque brin est formé de 3 fils parallèles de 4^{mm},4 sur 5^{mm},0. Les bobines ont été enroulées sur gabarit. Chaque collecteur se compose de 146 lames avec feuilles de mica de 0^{mm},8. Le

diamètre d'alésage des pièces polaires est de 771 millimètres. Les 6 bobines inductrices sont en série ; elles se composent chacune de 2 150 spires de fil de 2^{mm},0 sur 2^{mm},4.

Deux batteries d'accumulateurs servent à alimenter le réseau d'éclairage : elles comprennent chacune 150 éléments de 887 ampère-heures répartis en deux demi-batteries de 75 éléments.

Une batterie de traction fonctionne en tampon et comprend 300 éléments de 162 ampère-heures : elle est chargée au moyen du survolteur placé en sous-sol.

Le tableau de distribution comprend un certain nombre de panneaux relatifs aux différentes machines et permettant divers couplages.

Les 1er et 2e panneaux desservent les groupes V et VI ; les 4e 5e et 6e desservent 3 feeders d'éclairage ; le 7e et le 10e panneau sont affectés chacun à la moitié d'une batterie d'éclairage ; les 8e et 9e desservent également la batterie d'éclairage. Les 11e et 12e panneaux desservent la dynamo du 2e groupe : ils portent un démarreur pour le moteur à gaz, la dynamo fonctionnant comme motrice avec le courant de 12 éléments d'accumulateurs. Le 14e panneau est affecté au groupe I : il porte aussi un démarreur ; les 15e et 16e panneaux desservent chacun la moitié de la deuxième batterie d'éclairage ; le 17e panneau dessert le groupe IV et le 18e panneau le groupe IV. Le 19e panneau est affecté à la batterie de traction ; les 21e, 22e. 23e et 24e tableaux desservent les feeders de traction.

Un tableau de 5 panneaux porte des adjoncteurs-réducteurs relatifs l'un à la batterie de traction, les quatre autres aux quatre demi-batteries d'éclairage.

Sous-station. — La sous-station comprend deux étages en sous-sol et un rez-de-chaussée, comprenant une salle de machines et une salle de distribution. Le sous-sol supérieur contient les appareils de branchement et les coupe-circuits des machines : le sous-sol inférieur contient les transformateurs et les coupe-circuits, les interrupteurs et les commutateurs.

L'énergie électrique est reçue du Kubelwerk sous forme de courants triphasés à 10 000 volts. La tension est abaissée à 3 400 volts par un groupe de transformateurs. De là, les courants triphasés vont soit aux moteurs des groupes convertisseurs de la sous-station, soit à l'usine centrale, par le jeu des commutateurs.

Trois groupes convertisseurs ont été prévus. Chaque groupe comprend un moteur triphasé de 250 chevaux à 14 pôles, avec bagues de contact et dispositif de démarrage, et une dynamo génératrice à courant continu. Le moteur triphasé a 1 300 millimètres d'alésage au stator qui porte 168 encoches contenant chacune 14 conducteurs de 4^{mm},2 $\times$ 4^{mm},8. Le rotor a un diamètre de 1 298^{mm},5 et porte 210 encoches contenant chacune un conducteur formé de 9 fils de 3^{mm},4 en parallèle. La dynamo génératrice à courant continu a un induit de 854 millimètres de diamètre et de 380 millimètres de longueur axiale portant 129 encoches de 9 $\times$ 36. Le collecteur est formé de 258 lames. Le diamètre d'alésage des inducteurs est de 870 millimètres : l'enroulement inducteur comprend six bobines en série contenant chacune 1 400 tours de fil de 2^{mm},2 $\times$ 2^{mm},6.

Le tableau de distribution porte tous les appareils nécessaires pour le service des machines et des feeders de distribution.

Lignes de transmission et de distribution. — L'énergie électrique de l'usine de Erlenholz, dont 60 chevaux sont cédés à la ville, est amenée par une ligne composée de 3 fils de cuivre de 7 millimètres de diamètre. Une ligne triphasée de 4^{mm},5 de diamètre s'y raccorde et est prolongée par un câble triphasé de 3 $\times$ 15 millimètres carrés de section qui aboutit à l'usine génératrice.

La ligne à haute tension reliant Saint-Gall à l'usine de la Goldach est composée de 3 fils de cuivre de 5^{mm} 1/2 : elle est supportée par des poteaux en bois distants de 32 mètres envi-

ron. Chaque poteau est muni d'une calotte de fonte avec pointe, reliée à la terre. Les points exposés de la ligne sont munis de parafoudres. La ligne aboutit, à la station centrale, à une tour métallique munie de parafoudres, et traverse le toit par une plaque en verre épais. La longueur totale de la ligne est de 5 kil. 1/2.

La troisième ligne de transmission est dérivée de la ligne du Kubelwerk : elle est formée de fils de 4 millimètres de diamètre et suit la vallée de la Demut. Elle se raccorde, sur une tour métallique, à un câble souterrain de $3 \times 12^{mm^2},5$ de section qui aboutit à la sous-station : le câble à 380 mètres de longueur. La ligne ne doit pas transporter plus de 5500 kilowatt-heures par jour.

Une quatrième ligne, mi-aérienne mi-souterraine, relie la sous-station à l'usine génératrice : elle est établie pour 3400 volts, et part des secondaires des transformateurs de la sous station.

Le réseau de distribution à courant continu est à trois fils et est établi pour une tension de 2×120 volts : il est desservi par un certain nombre de feeders souterrains.

Tramway. — Le réseau de tramways a été installé et est exploité par la commune elle-même. Toutes les installations électriques furent confiées aux Ateliers d'Oerlikon, et la mise en service du tramway eut lieu en 1897. La longueur totale de la voie est de $11^{km},700$. Par suite de l'étroitesse des rues, la ligne a dû être établie en voie simple et présente de très faibles rayons de courbure : le rayon minimum est de 15 mètres. La pente maxima atteint 6,4 °/₀. La voie a un écartement de 1 mètre ; elle est établie en rails de $42^{kgr},8$ par mètre courant.

La tension d'exploitation est de 550 volts ; la chute de tension maxima atteint 50 volts. Quatre feeders alimentent la ligne qui est divisée en quatre sections : en dehors des rails, il existe aussi des feeders de retour. La ligne de travail est formée d'un fil de cuivre dur de 8 millimètres de diamètre suspendu à $6^m,50$ du sol et supporté soit par les poteaux, soit par des fils de suspension transversaux en acier galvanisé.

Le service est assuré par des automotrices munies de deux moteurs de 20 chevaux chacun, et de controllers à 6 vitesses. Les moteurs sont tétrapolaires : l'induit de chacun d'eux a un diamètre de 404 millimètres et une longueur axiale de 300 millimètres : ils sont bobinés en anneau. Les organes de prise de courant étaient, au début, des archets de contact, et sont, maintenant, des trôlets à roulette du modèle ordinaire.

A. SOLIER.

REVUE INDUSTRIELLE ET SCIENTIFIQUE

THÉORIES ET GÉNÉRALITÉS

***Relation entre la conductibilité électrique et la température pour les corps solides.* — J. Koenigsberg et O. Reichenheim.** — *Physikalische Zeitschrift*, 15 août 1906.

L'auteur a fait un certain nombre d'expériences, avec du courant alternatif et du courant continu, pour déterminer la conductibilité électrique d'oxydes et de sulfures métalliques, et reconnaître si cette conductibilité est de nature électrolytique ou purement métallique. Les expériences préliminaires, faites sur différents minerais de fer, ont donné des valeurs exactement concordantes pour les mesures faites sur courant alternatif et sur courant continu. Cette concordance montre qu'il n'y a pas de polarisation électrique, et que la résistance de passage est faible.

Une baguette de fer de 2 millimètres de diamètre et 10 millimètres de longueur fut placée entre deux électrodes de platine recouvertes de noir de pla-

tine, après que ses extrémités eussent été oxydées. Les valeurs de la résistance furent de 0,045 ohm à 460° et de 0,067 ohm à 1 020° : la concordance des résultats obtenus avec du courant continu et avec du courant alternatif prouve qu'il n'y avait pas de force contre-électromotrice. Aucune force contre-électromotrice, supérieure à 0,0001 volt, et aucune trace de conductibilité unipolaire ne purent être décelées sur des cristaux purs. De même, il n'existe aucune modification du sel étudié. La conductibilité des oxydes et des sulfures ne peut donc pas être de nature électrolytique. On doit donc admettre que la conductibilité de ces sels est métallique. Cependant la relation entre la résistance et la température est, en général, différente de celle trouvée pour les métaux, et la courbe de la résistance en fonction de la température est très particulière.

Plus la température est élevée, plus les propriétés électriques de ces sels se rapprochent de celles des métaux ; plus la température est basse, et plus la résistance croît rapidement. Entre la grandeur de la résistance et le coefficient de température, il existe une relation telle que, lorsqu'une résistance déterminée est atteinte, le coefficient de température est égal, en grandeur et en signe, à celui du métal, et cette valeur limite de la résistance peut vraisemblablement être atteinte pour toute substance : toutefois, il faut, pour cela, une température très élevée. Pour des températures inférieures à celle qui correspond à la valeur limite, le coefficient de température est négatif et devient d'autant plus grand que la résistance est plus élevée, ou, ce qui revient au même, que la température est plus basse.

On peut supposer, d'après ces résultats, que, par suite de l'élévation de la température dans les oxydes et sulfures, le nombre des électrons libres augmente jusqu'à ce que la majeure partie d'entre eux soit devenue libre : à ce moment les propriétés sont les mêmes que celles des métaux, dans lesquels les électrons sont presque tous mobiles, même à la température normale. La libération ou la dissociation des électrons doit pouvoir être exprimée par la formule connue $C = e^{-q/T}$, en appelant C la concentration en molécules grammes par centimètre cube, q la chaleur de combinaison correspondante en grandes calories de une molécule gramme à la température absolue T. En appelant N le nombre des électrons libres, on peut poser $N = N_0 e^{-q/T}$, en appelant N_0 le nombre total des électrons en centimètres cubes de la substance considérée.

Les phénomènes présentés par les électrons libres ou dissociés doivent être les mêmes que dans les métaux. La conductibilité dans ceux-ci peut être représentée empiriquement par la formule

$$T = T_0 (1 - \alpha t \mp \beta t^2),$$

α étant compris entre 0,002 et 0,004, B entre + 0,000009 et — 0,000009. T_0. est proportionnel au nombre N des supports libres d'électricité, d'où

$$T = c N_0 e^{-q/\tau} (1 - \alpha t \mp \beta t^2)$$

ou

$$T = C_1 e^{-q/\tau} (1 - \alpha t \mp \beta t^2).$$

La résistance est donc donnée par la formule :

$$w = C' (1 + \alpha t \pm \beta t^2) e^{+q/(t+273)}.$$

En posant la constante C' égale à w_0, résistance à 0° centigrade, on a :

$$w = w_0 (1 + \alpha t \pm \beta t^2) e^{+q\left(\frac{1}{t+273} - \frac{1}{273}\right)}.$$

Cette formule contient une seule constante absolument arbitraire q, qui peut être comprise entre 0 et ∞, mais semble pratiquement comprise entre 0 et + 10 000. Cette constante q peut dépendre de la température : cependant elle semble avoir une valeur constante en première approximation.

L'accord entre la formule théorique et l'observation a été calculé pour l'oxyde de fer Fe^2O^3. Le tableau I indique les valeurs de la résistance observée et les valeurs calculées d'après la formule :

$$w = 0{,}876 (1 + 0{,}00387\, t \pm 0{,}00000026\, t^2) e^{1400\, T}.$$

Pour différents autres sels, la comparaison entre les valeurs calculées et les valeurs observées montre que la formule donnée s'applique entre 16° et 250° et donne des valeurs presque exactement concordantes avec les valeurs observées.

L'auteur indique que différents corps, encore mauvais conducteurs à des températures relativement élevées, tels le quartz, le zirconium, l'oxyde de magnésium, etc., ont les mêmes propriétés que les oxydes et sulfures métalliques étudiés, avec la seule différence que la valeur de leur constante q est plus élevée. Les expériences de Nernst et Bose ont déjà montré que les mélanges d'oxydes élevés à une haute tempé-

rature par le passage du courant électrique, et se trouvant peut-être à l'état demi-fluide, ne s'éloignent pas beaucoup de la loi de Faraday. Si on admet que la conductibilité dans les bâtonnets Nernst est purement électrolytique, il faut admettre un fort courant résiduel produit par des vitesses de diffusion extraordinairement élevées. Des expériences récentes de Horton ont montré que certains oxydes tout à fait purs tels que le quartz, la magnésie, l'oxyde de plomb et l'oxyde de cuivre, qui sont, à la température ordinaire, de très mauvais conducteurs, présentent, aux températures élevées, la conductibilité métallique. Ce physicien a montré, par comparaison graphique des courbes de deux corps, que la conductibilité peut être représentée d'après ses observations par la formule $(1/2)\,\mathrm{A\,T\,E}^{-b/T}$ qui, d'après Richardson et Wehnelt, donne le nombre des électrons négatifs émis dans un tube à vide.

t	RÉSISTANCE ABSOLUE	
	w OBSERVÉ	w CALCULÉ
0	»	0,876
16	0,7035	0,702
40	0,554	0,553
88	0,360	0,365
123	0,269	0,270
140	0,250	0,248
181	0,1985	0,197
197	0,184	0,186
237	0,156	0,159
»	»	t calculé
— 74 (?)	4,85	— 78
— 130	57,2	— 132
— 146	129,5	— 146
— 185	environ 3 000	— 178

Cette formule ne concorde pas tout à fait avec la formule donnée par l'auteur, mais tant que T est inférieur ou égal à c, elle donne des valeurs qui diffèrent peu de celles obtenues au moyen de la formule de l'auteur.

Quand les sels sont liquides, la conductibilité électrolytique domine, et parfois existe seule, comme l'ont montré de nombreuses expériences de Lorenz. La formule de l'auteur s'applique donc surtout aux cas où les substances sont à des températures très inférieures à leur température de fusion, et s'applique mal, au contraire, pour les températures élevées, dans le cas des substances de nature vitreuse, comme du quartz fondu ou des silicates, dans lesquelles il se produit un passage progressif de l'état solide à l'état liquide, et où, vraisemblablement, le même phénomène a lieu pour la nature de la conductibilité électrique.

L'auteur a appliqué sa formule aux résultats de mesures de Horton, et a trouvé que, pour l'oxyde de cuivre, les valeurs observées et calculées sont concordantes : ce n'est qu'aux basses températures, où la résistance a des valeurs supérieures à 100 000 ohms, que l'on constate des écarts systématiques provenant sans doute de ce que, là où la conductibilité est extrêmement faible, de faibles impuretés ont une influence très sensible. Pour le quartz fondu, les différences entre les valeurs observées et les valeurs calculées sont assez importantes : cela provient probablement de l'apparition d'une conductibilité électrolytique qui existe certainement dans les composés fluides ou mi-fluides.

Les mesures, faites sur le sulfure de plomb PbS, ont montré que ce sel présente aussi, au point de vue du coefficient de température, la conductibilité métallique. On doit admettre que, comme pour la pyrite, le coefficient de température devient négatif aux très basses températures (— 30° pour la pyrite; — 180° probablement pour le sulfure de plomb). Cette hypothèse peut être étendue aux métaux eux-mêmes. Les mesures de résistance de Dewar aux très basses températures ont montré que les résistances ne varient plus de la même façon qu'entre — 180° et les températures les plus élevées. Les mesures de Chappuis, Harker, et Holborn ont montré que la résistance du platine peut être exprimée par une formule à trois constantes, applicable entre — 180° et + 500° : cette formule est de la forme :

$$w = w_0 (1 + \alpha t \mp \beta t^2 + \delta t^3).$$

Cette formule n'est plus applicable pour les températures inférieures à 200°, comme l'a montré Meilink. A — 210°, la différence entre la valeur calculée et la valeur observée est de 0,5° ; à — 252°, comme l'a montré Dewar, l'écart est de — 14°.

La courbe de résistance du platine au-dessous de — 200° doit donc présenter une allure

tout à fait différente que celle relative aux températures supérieures à — 200°.

Le fer présente, d'une façon encore beaucoup plus marquée, la même propriété. Tandis que, si l'on s'appuie sur les observations faites entre + 500° et — 180°, on doit s'attendre, pour une température de — 252°, à une résistance inférieure à 0,01 w_0, cette résistance est en réalité égale à 0,125 w_0, et il serait possible que le point pour lequel $dw/dt = 0$ soit compris dans les températures que l'on sait produire actuellement, ou bien soit très voisin de celles-ci.

Pour d'autres métaux, argent, or, cuivre, ce point est au contraire très bas : la valeur de q, chaleur de dissociation de leurs électrons, doit être très faible.

Quand la majeure partie des électrons est dissociée, la résistance est proportionnelle à $\sqrt{8\alpha m T}/e^2 l$. Si la longueur de parcours et α restaient constants, la résistance serait proportionnelle à la racine carrée de la température absolue : comme ce n'est pas le cas, on doit admettre que la longueur de parcours diminue quand la température croît, et cela différemment pour les différents métaux. Cependant, abstraction faite de la dissociation des électrons, il n'est pas possible que la résistance soit proportionnelle à la température, car la longueur de parcours serait très grande pour les basses températures et serait infinie au 0° absolu. Vraisemblablement, comme le montrent quelques calculs, on doit avoir.

$$l = \frac{l_0}{1 + f(T)},$$

$f(T)$ étant une fonction compliquée, telle que .

$$Ae^{-cT}\, T^{(0,5 + b)}.$$

De ce que la dérivée dw/dt est positive pour la plupart des corps, quand la résistance absolue est devenue plus petite que 0,01 à 0,001 environ, il résulte que la grandeur $e_1 N_0$ est du même ordre de grandeur pour la plupart des substances. Si l'on part des formules de Drude et de Lorentz, on peut poser

$$e_1 N_0 = \frac{e^2 N_0 l}{\sqrt{8\alpha m T}}.$$

De ce qui précède, l'auteur tire quelques déductions importantes, concernant la conduction de l'électricité dans les corps solides. Il indique en outre que les oxydes et sulfures bons conducteurs sont paramagnétiques, les oxydes et sulfures mauvais conducteurs étant diamagnétiques : cette règle est applicable quand il existe plusieurs oxydes différents (PbO^2 mauvais conducteur, diamagnétique ; PbO bon conducteur, paramagnétique ; Cu^2O mauvais conducteur, diamagnétique ; CuO, meilleur conducteur, faiblement paramagnétique). R. V.

Sur l'effet de doublet dans l'azote et sur les ions positifs. — **W. Hermann**, — *Physikalische Zeitschrift*, 15 août 1906.

Dans une précédente étude faite en collaboration avec Stark et relative au spectre de la lumière des rayons-canal dans l'azote et l'hydrogène, l'auteur a observé l'effet de doublet sur les rayons-canal dans l'hydrogène : il lui a semblé intéressant d'étudier le même phénomène dans l'azote.

Pour amener l'azote à la luminescence, l'auteur a employé des tubes à vide préalablement remplis d'azote. Ces tubes étaient cylindriques et avaient 5 à 6 centimètres de diamètre : les deux électrodes, formées par des disques en aluminium, étaient distantes de 25 à 40 centimètres; le disque cathodique portait un grand nombre de trous. Comme source de courant, on employait trois batteries donnant ensemble une différence de potentiel de 7 500 volts, et une génératrice à 3 000 volts : les quatre sources de courant pouvaient être reliées en série. Pour les plus hautes tensions, on employait une bobine d'induction de forte taille.

Un petit spectrographe à prisme servait pour les mesures. Les sources lumineuses suivantes furent spectrographiées :

1° Etincelles à l'air libre sans bouteille de Leyde : 4 centimètres de distance entre les électrodes en zinc, entre lesquelles on produisait un violent courant d'air.

2° Étincelles à l'air libre avec bouteille de Leyde en parallèle : 4 millimètres de distance entre les électrodes en platine: courant d'air comme précédemment.

3° Spectrogrammes obtenus avec le tube à vide :

a) Colonne lumineuse positive non stratifiée.

b) Couche négative (1 500 volts aux bornes environ).

c) Première couche cathodique (3 500, 4 000 et 6 000 volts).

d) Espace des rayons-canal (1 500 volts).

e) Espace des rayons-canal (2 200-7 000 volts et 15 000 volts environ avec la bobine).

On connaît pour l'azote trois spectres de bandes différents ; l'un d'eux, compris dans la région des ondes longues, est très important pour la coloration totale que présente, dans différentes conditions, l'azote luminescent, mais ne peut être décelé par la plaque photographique. Les deux autres sont connus comme spectre positif (A) et spectre négatif (B).

On n'a pas trouvé de séries de raies pour l'azote. L'auteur classe les raies en groupes ne comprenant que des raies qui apparaissent avec une grande intensité dans un ou plusieurs spectrogrammes. La raie 3 919, 2, très marquée dans les spectres d'étincelles, n'a pas pu être séparée, car sa place était occupée par une forte bande négative voisine. Elle semble appartenir au groupe D. Il en est de même d'un certain nombre de raies très étalées existant dans le spectre de l'étincelle avec une bouteille de Leyde et analogues aux raies du groupe E.

GROUPE C λ	GROUPE D λ	GROUPE E λ	GROUPE F λ
{ 5 005,7	4 447,2	4 530,3	5 565
{ 2,7	3 956,1	4 432,0	4 150,5
4 643,4		4 041,4	4 110
30,9		35,2	4 100
22,0			
14,2			
07,2			
01,3			
3 995,3			

Grâce à ce classement, on peut représenter par le tableau I le contenu des différents spectogrammes.

TABLEAU I

	SPECTRES DE BANDES		GROUPES DE RAIES			
	A	B	C	D	E	F
Étincelles sans bouteille de Leyde.	intense.	»	intense, large.	intense, large.	»	»
Étincelles avec bouteille de Leyde.	»	»	intense, large.	intense, large.	moyen.	»
Colonne positive	intense.	»	»	»	»	»
Couche négative.. . . .	intense.	intense.	intense, net.	moyen, net.	intense, net.	faible, net.
Première couche cathodique 4 000 volts..	faible.	intense.	intense, net.	»	intense, net.	intense, net.
Espace des rayons-canal 1 500 volts..	moyen.	intense.	»	»	»	intense, net.
Espace des rayons-canal 4 000 volts..	moyen.	intense.	intense, net.	»	intense, net.	intense, net.
Effet de doublet.	»	»	nettement marqué	»	nettement marqué.	dépendant de la raie de repos.

Dans la lumière des rayons-canal, quand la tension augmente, le premier spectre de bandes disparaît de plus en plus ; les groupes de raies C et E augmentent fortement d'intensité, tandis que celles du groupe F semblent s'affaiblir.

Les spectrogrammes relatifs à l'espace des rayons-canal à 1 500 volts sont particulièrement intéressants ; aucune des raies intenses du spectre d'étincelles ne s'y trouve avec une intensité sensible. Les raies, fortement marquées, rassemblées dans le groupe F, ne sont sans doute pas dues à des impuretés, mais appartiennent réellement à l'azote, comme le montre la régularité de leur formation ; elles sont absentes dans les spectrogrammes obtenus avec les mêmes tubes remplis d'autres gaz (H^2, vapeur de Hg): elles se retrouvent aussi quand le tube est rempli d'air atmosphérique.

Dans des spectrogrammes obtenus parallèlement sur l'espace des rayons cathodiques, les parties constitutives du spectre émises par les rayons-canal atteignant la fente du spectrographe doivent

paraître déplacées. Les spectres de bandes ne présentent pas cet effet de doublet : ils ne sont donc pas émis par les rayons-canal. Cette observation est en concordance avec l'hypothèse de Stark, que les spectres de bandes sont émis lors de la recomposition des ions positifs avec les électrons négatifs pour produire des atomes neutres.

Parmi les raies, celle dont la longueur d'ondes est de 3 995,3 unités Angström se prête bien à des observations exactes par suite de son intensité et de sa position dans la région de forte dispersion du spectrographe. Sur le spectrogramme, on voit à gauche les bords d'une bande positive, puis la raie de repos nette 3 995, 2, émise par les ions qui se trouvent en repos relatif, puis à droite une bande un peu étalée, le doublet dû aux ions en mouvement ; entre la raie de repos et le doublet est un minimum d'intensité large et profond : ce minimum est encore plus marqué que pour les raies H dans les conditions correspondantes. Pour une différence de potentiel de 6 000 volts entre électrodes, on trouve comme déplacement maximum observé 3,5 unités Angström : la vitesse maxima qui s'en déduit pour les rayons-canal

$$v = (\Delta\lambda/\lambda) \text{ vitesse de la lumière}$$

est $v = \dfrac{300\,000 \,.\, 3,5}{3\,995,3}$ km. $= 263$ km.

Théoriquement, la vitesse maxima de l'ion azote monovalent pour une chute cathodique de 6 000 volts doit être

$$v = \sqrt{2\varepsilon V/\mu} = 285 \text{ km.}$$

Il semble donc vraisemblable que la raie 3 995, 3 appartient à un ion azote monovalent. L'ion devrait être plurivalent quand des forces retardatrices abaissent sensiblement la vitesse maxima.

Pour différentes tensions, les écarts maxima de l'effet de doublet par rapport à la raie de repos sont à peu près comme les racines carrées des tensions ; la largeur du minimum d'intensité ne croît par contre que peu quand la tension augmente.

Un grand nombre d'autres raies présentent de même l'effet de doublet et, dans aucun cas, l'auteur n'a pu calculer, d'après la valeur de l'écart, une vitesse maxima des ions différant sensiblement de celle déduite de la raie 3 995, 3. Les raies des groupes C et E présentent toutes l'effet de doublet. L'apparence du doublet est semblable à celui de la raie 3 995, 3.

Parmi les raies du groupe F, les raies 4 110 et 4 100 sont surprenantes par l'intensité et la nature de l'effet de doublet. Ce n'est qu'aux tensions élevées qu'il se produit un faible minimum d'intensité ; jusqu'à 6 000 volts, l'effet de doublet présente une intensité constamment décroissante depuis la raie de repos vers le violet. La raie 4 150, 5 présente un aspect analogue ; mais l'effet est plus faible : la raie 5 565 semble éloignée (elle est dans une région que le spectrographe ne peut pas enregistrer nettement). L'effet de doublet des raies F ressemble beaucoup à celui des raies de l'hydrogène, quand les rayons-canal de l'hydrogène traversent des milieux fortement absorbants.

Jusqu'à présent, il était douteux que les métalloïdes pussent former des ions positifs. Un grand nombre de raies de l'azote présentent l'effet de doublet qui provient d'ions azote positifs. L'existence d'ions positifs de métalloïdes est donc prouvée.

Plusieurs spectrogrammes ont présenté aussi les raies de l'hydrogène H_β H_γ H_δ. D'une part, ces raies ont présenté du côté du rouge un effet indiquant une réflexion des rayons-canal ; d'autre part, le minimum d'intensité avait complètement disparu du côté du violet, et l'auteur en a conclu à une action de la dispersion des rayons de l'hydrogène dans l'intérieur du gaz. Avec la collaboration de S. Kinoshita, l'auteur a étudié séparément ces deux effets [1].

B. L.

GÉNÉRATION ET TRANSFORMATION

***Sur la commutation dans les machines compensées.* — Marius Latour.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 16 août 1906.

L'auteur revient à l'étude de Richter sur le moteur série monophasé Siemens Schuckert [2] et ajoute à cette publication quelques remarques générales sur la commutation dans les machines compensées.

La suppression complète de la réaction d'in-

(1) *Éclairage Électrique*, tome XLVIII, 8 septembre 1906, page 376.

(2) Voir *Éclairage Électrique*, tome XLVIII, 14, 21, 28 juillet et 4 août, pages 69, 105, 149 et 189.

duit dans une machine compensée peut être définie à deux points de vue différents :

1° Le nombre d'ampère-tours de l'enroulement compensateur est choisi de telle façon que la commutation soit parfaite sur courant continu.

2° Le nombre d'ampère-tours de l'enroulement compensateur est choisi de telle façon que l'induction mutuelle entre l'enroulement compensateur et l'enroulement induit supprime la self-induction de l'induit, c'est-à-dire de façon que, sur courant alternatif, aucune force électromotrice de self-induction ne soit induite entre les balais.

D'après les deux points de vue, le nombre d'ampère-tours de l'enroulement compensateur doit être plus élevé que le nombre d'ampère-tours de l'enroulement induit, par suite de la dispersion. Les deux points de vue concordent théoriquement

Compensation d'après le premier point de vue. — L'auteur considère un induit (fig. 1) sur lequel, pour plus de simplicité, on suppose bobiné un enroulement Gramme avec une seule bobine par encoche. Le balai sur le collecteur a la largeur d'une lame et, à l'instant considéré, le balai ne repose que sur une seule lame, de sorte qu'aucune bobine n'est court-circuitée.

La commutation est le phénomène en jeu quand la bobine S_1 prend le rôle électrique et magnétique de la bobine S_2. Soit Φ_1 le flux total embrassé par la bobine S_1. Dans le flux Φ_1 sont comprises les lignes de force de toutes les origines (enroulement compensateur ou induit). De même, soit Φ_2 le flux total embrasé par la bobine S_2. Le remplacement de la bobine S_1 par la bobine S_2 ne produit certainement pas de phénomène inattendu (étincelles) si Φ_1 et Φ_2 ont la même valeur. Soit Ψ l'induction moyenne résultante dans l'espace S_1 S_2 dans la direction Oa (fig. 1), c'est-à-dire principalement dans la dent Z : soit Λq la section de l'espace compris entre S_1 S_2. On a l'équation :

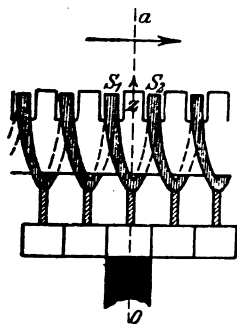


Fig. 1.

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \Psi \Lambda q.$$

Donc Φ_1 et Φ_2 ont la même valeur quand Ψ est nul.

On peut se représenter deux champs différents existant à la périphérie de l'induit ; le champ produit par l'enroulement induit, et le champ produit par l'enroulement de compensation. Soit Ψ_A l'induction dans l'espace S_1 S_2 due au flux de l'induit, et Ψ_C celle due au flux du stator. La commutation parfaite correspond à la condition d'égalité de Ψ_A et Ψ_C. Cette égalité n'est évidemment atteinte que quand le nombre d'ampère-tours de l'enroulement compensateur est plus élevé que le nombre d'ampère-tours de l'enroulement induit, car le flux de dispersion des bobines de l'induit doit être neutralisé.

On peut aussi étudier la commutation analytiquement en séparant les différentes forces électromotrices agissant dans la bobine court-circuitée. Soit L le coefficient de self-induction de la bobine court-circuitée. (Ce coefficient est déterminé par le nombre total de lignes de force émanant de cette bobine, et non pas par le flux de dispersion seulement.) Soient I le courant amené au balai et T la durée du court circuit. La commutation elle-même développe dans la bobine court-circuitée une première force électromotrice dont la valeur moyenne est $E_1 = L i/T$. Toutes les bobines de l'induit se déplaçant avec la bobine en court-circuit, leur flux (c'est-à-dire le flux de l'induit) ne peut pas induire de force électromotrice dans la bobine court-circuitée.

On peut remarquer que, dans une machine ordinaire à pôles saillants, il existe une réaction des bobines en circuit sur la bobine court-circuitée. Le coefficient M de l'induction mutuelle entre bobines en circuit et bobine court-circuitée n'est nul, dans une telle machine, que quand l'axe des bobines en circuit concorde exactement avec l'axe de la zone neutre géométrique. Sinon, le coefficient a une certaine valeur qui dépend de la position de l'axe des bobines en circuit. Cet axe tournant pendant la durée du court-circuit, le coefficient M varie pendant ce temps. Au début du court-circuit, il a une valeur M_1 ; à la fin, il a une valeur M_2. Par suite, il existe, dans la bobine court-circuitée, une deuxième force électromotrice

$$E_2 = \frac{M_1 - M_2}{T} I.$$

Cette deuxième force électromotrice, très importante, est opposée à la première.

Dans les machines à stator uniformément denté (pour lesquelles on peut dire que la réluctance magnétique est la même suivante tous les axes), M est toujours nul, quelle que soit la position de l'axe des bobines en circuit, et il n'y a pas de force électromotrice particulière E_2 induite. Le champ du stator seul, dans lequel se déplace la bobine court-circuitée, induit une force électromotrice E_2.

La compensation parfaite est alors atteinte quand le nombre d'ampère-tours de l'enroulement compensateur correspond à un champ tel que $E_2 = LI/T$. En appelant m le nombre de tours d'une bobine, on voit facilement que l'on a :

$$E_3 = \frac{m\Psi_C \Lambda q}{T}.$$

Mais on peut prouver, en toute rigueur, que pour une machine à stator uniformément denté, on a : $LI = m \cdot \Psi_A \cdot \Lambda q.$

L'expression LI dépend donc étroitement du flux de l'induit dans l'espace $S_1 S_2$ quoiqu'elle corresponde à la self-induction totale de la bobine court-circuitée considérée en particulier. Finalement, la condition $E_2 = LI/T$ concorde avec la condition :

$$\Psi_C = \Psi_A; \quad \Psi = 0.$$

D'une façon toute générale, on peut dire que la valeur de la commutation doit être jugée d'après l'induction résultante dans l'espace $S_1 S_2$.

L'auteur considère ensuite l'induit total (fig. 2)

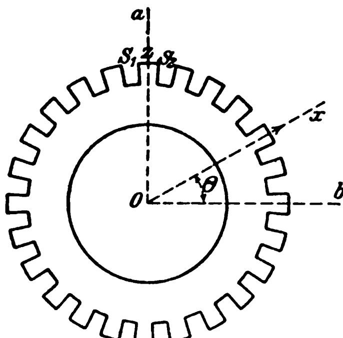


Fig. 2.

et désigne par les variables φ_A, φ_C, φ les inductions à la périphérie de l'induit, correspondant aux flux de l'induit et du stator, et au flux résultant suivant un axe arbitraire ox.

Soit Ob perpendiculaire à Oa et $\widehat{bOx} = \Theta$. Les variables φ_A φ_C et φ sont des fonctions de Θ et sont de la forme :

$$\varphi_A = \varphi_{A_1} \sin \Theta + \varphi_{A_3} \sin 3\Theta + \cdots$$
$$\varphi_C = \varphi_{C_1} \sin \Theta + \varphi_{C_3} \sin 3\Theta + \cdots$$
$$\varphi = \varphi_1 \sin \Theta + \varphi_3 \sin 3\Theta + \cdots$$
$$\varphi = (\varphi_{A_1} - \varphi_{C_1}) \sin \Theta + (\varphi_{A_3} - \varphi_{C_3}) \sin 3\Theta + \cdots$$

L'induction résultante Ψ dans l'espace $S_1 S_2$, c'est-à-dire pour $\Theta = \pi/2$, est donnée par l'expression :

$$\Psi = \varphi_1 - \varphi_3 + \varphi_5 \cdots$$
$$= (\varphi_{A_1} - \varphi_{C_1}) - (\varphi_{A_3} - \varphi_{C_3}) + (\varphi_{A_5} - \varphi_{C_5}).$$

La commutation parfaite correspond à l'équation :

$$\varphi_1 - \varphi_3 + \varphi_5 \cdots$$
$$= (\varphi_{A_1} - \varphi_{C_1}) - (\varphi_{A_3} - \varphi_{C_3}) + (\varphi_{A_5} - c_5) \cdots = 0 \quad (\alpha)$$

et cette équation détermine la compensation d'après le premier point de vue.

Compensation d'après le deuxième point de vue. — Quand a lieu la neutralisation de la self-induction de l'induit sur courant alternatif ?

On peut montrer que la tension déwattée, mesurée entre les balais, est proportionnelle à $\int_0^{\pi/2} \varphi \, \Theta \, d\Theta$. L'intégration donne :

$$\int_0^{\pi/2} \varphi \cdot \Theta d\Theta = \varphi_1 - \frac{\varphi_3}{3^2} + \frac{\varphi_5}{5^2} \cdots$$

Pour que la self-induction de l'induit disparaisse entièrement, on doit avoir :

$$\varphi_1 - \frac{\varphi_3}{3^2} + \frac{\varphi_5}{5^2} \cdots$$
$$= (\varphi_{A_1} - \varphi_{C_1}) - \frac{(\varphi_{A_3} - \varphi_{C_3})}{3^2} + \frac{(\varphi_{A_5} - \varphi_{C_5})}{5^2} = 0. \quad (\beta)$$

L'équation β détermine la compensation d'après le deuxième point de vue.

Si le flux de compensation et le flux de l'induit ont la même répartition à la périphérie de l'induit, on a :

$$\frac{\varphi_{C_1}}{\varphi_{A_1}} = \frac{\varphi_{C_3}}{\varphi_{A_3}} = \frac{\varphi_{C_5}}{\varphi_{A_5}}.$$

La suppression complète des crachements aux balais en courant continu et la suppression de la self-induction en courant alternatif sont donc obtenues en même temps, quand on a :

$$\varphi_{C_1} = \varphi_{A_1}; \quad \varphi_{C_3} = \varphi_{A_3} \cdots$$

En pratique, quand l'enroulement compen-

sateur est relativement concentré, la suppression complète des crachements aux balais et celle de la self-induction ne se produisent pas en même temps. Cela provient de ce que la répartition du champ de compensation n'est pas parfaite.

Après ces considérations générales sur la commutation et la compensation, l'auteur considère le cas des balais de court-circuit dans un moteur à répulsion compensé.

Dans un tel moteur, on peut dire que l'enroulement statorique sert d'enroulement compensateur pour l'enroulement rotorique dans l'axe du court-circuit. La compensation a lieu en fait d'après l'équation β. En outre, l'enroulement statorique peut être réparti et utilisé exactement comme l'enroulement rotorique. On peut donc admettre que, pour une machine bien établie, l'équation (β) se rapproche beaucoup de l'équation (α).

R. V.

Sur les moteurs monophasés à collecteur. — **F. Eichberg.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 16 août 1906.

L'auteur revient à l'étude publiée par Richter ([1]) sur le moteur série monophasé Siemens-Schuckert, étude au cours de laquelle il a été question à plusieurs reprises du moteur à répulsion compensé inventé par l'auteur et par Winter. Il fait sur cette étude les remarques suivantes :

Démarrage. — 1° Richter part de l'affirmation qu'au démarrage la puissance absorbée est presque la même qu'en charge. Cette affirmation repose sur des résultats d'expériences d'un moteur Siemens-Schuckert (28 chevaux, 1000 tours, 50 périodes, 6 pôles). Sur la figure 1 sont reproduites les courbes des kilowatts en fonction des couples, publiées par Richter pour un moteur des Siemens-Schuckert-Werke (S. S. W.), et les mêmes courbes relatives à un moteur de locomotive du type Winter-Eichberg (W. E.) de 15 chevaux, 700 tours par minute à la vitesse normale et 1350 tours à la vitesse maxima, 50 périodes, 6 pôles. Ce moteur, qui appartient à la catégorie des moteurs à répulsion compensés, ne possède pas de résistances sur le rotor. On voit, par exemple, sur la figure 1, que le nombre de kilowatts absorbés pour 20 kilogrammètres est 4,5 fois plus faible dans le moteur W. E. que dans le moteur S. S. W. sans résistance, 2,7 fois plus faible que dans le moteur avec « balais durs » et résistances moyennes (0,01) et 1,42 fois plus petite que dans le moteur avec balais durs et

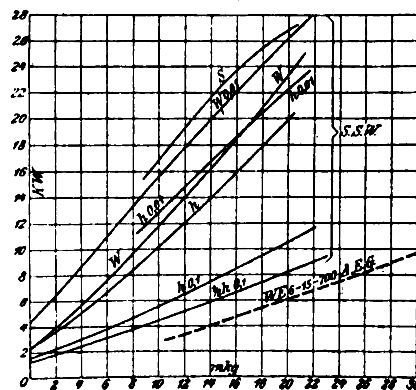


Fig. 1.

fortes résistances (0,1). Le cas mentionné par Richter, avec balais de demi-largeur et jonctions de résistance élevée, entre à peine en ligne de compte en pratique, car les pertes produites par le passage des courants de travail dans les jonctions résistantes représentent environ 10 % de la puissance du moteur. La densité de courant dans les balais atteindrait 16 ampères par centimètre carré ([1]).

Le diagramme de la figure 2 montre que, dans le moteur de l'A. E. G., la réaction des bobines court-circuitées par les balais est très faible.

([1]) Voir *Éclairage Électrique*, tome XLVIII, 14, 21, 28 juillet et 4 août 1906, pages 69, 105, 149 et 189.

([1]) La distinction entre les balais « durs » et les balais « tendres » faite par Richter n'est pas très claire. L'A. E. G. a fait, depuis 1902, des études sur les conductibilités tangentielles et radiales des charbons. Un bon charbon de moteur monophasé à collecteur doit présenter une résistance tangentielle aussi élevée que possible pour une résistance radiale aussi faible que possible. On peut citer les quelques valeurs suivantes en ohms par millimètre carré.

	RADIALEMENT	TANGENTIELLEMENT
Plania C.	52,2	100
N.	65	121
Le carbone SC.	68,3	109
National Carbon.	36,6	81,6

La constitution mécanique du charbon (dur ou tendre) détermine la résistance de passage entre le charbon et le collecteur.

Les ampère-tours actifs A.W. sont pratiquement en phase avec le courant dans le stator (J_1 en phase avec J_2.) Le cos $(90-\alpha)$ est égal à 0,96 d'après la figure. On peut donc établir des moteurs monophasés à collecteur sans jonctions résistantes dans l'induit, qui, au démarrage, n'absorbent qu'une partie (20 à 40 %) suivant la fréquence) de l'énergie électrique absorbée en marche pour le même couple.

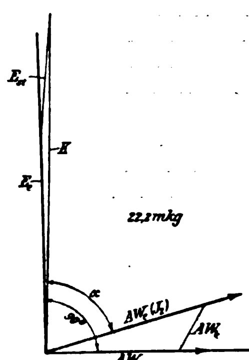


Fig. 2.

2° Les machines avec champ transversal sans jonctions résistantes ont donné de bons résultats depuis un ou deux ans même dans des conditions très dures de démarrage. Les charbons et le collecteur présentent un bon fonctionnement. L'auteur est donc d'avis que l'on peut et que l'on doit éviter l'emploi de jonctions résistantes dans l'induit.

Mais, en supposant que l'emploi des résistances soit utile ou nécessaire, cet emploi est possible dans tous les genres de moteurs. Dans les moteurs avec champ transversal dont le plus parfait, parce que le plus simple, est le moteur à répulsion compensé, les pertes dans les résistances de jonction seraient très faibles ou nulles dans une grande région de vitesses. Mais en pratique, l'emploi de résistances est à rejeter à cause de la difficulté que l'on éprouve à disposer ces résistances d'une façon satisfaisante au point de vue mécanique et de dissiper convenablement la chaleur qui s'y développe (2 à 5 % de la puissance du moteur).

L'enroulement supplémentaire de Richter est en réalité une résistance avec tous ses défauts. S'il doit exercer un couple actif, il doit être placé dans les encoches où, autrement, il y aurait du cuivre actif. Toutefois il n'est en circuit que pendant s/n (pratiquement 1/20 à 1/30) du temps et peut être prévu pour une densité de courant m fois (quatre à cinq fois) plus élevée. Son efficacité est donc donnée par le coefficient.

$$\zeta = \frac{m}{n} \frac{1}{\gamma} = 0{,}156 \quad \text{à} \quad 0{,}295$$

en donnant à γ la signification et la grandeur indiquées par Richter.

Si l'enroulement supplémentaire prend 20 % de la totalité de l'espace disponible pour l'enroulement, le rapport :

$$\frac{\text{efficacité de l'induit avec enroulement supplémentaire.}}{\text{efficacité de l'induit sans enroulement supplémentaire.}}$$

a la valeur suivante :

$$\frac{1 - 0{,}2 + 0{,}2\zeta}{1} = \frac{0{,}83}{1} \quad \text{à} \quad \frac{0{,}86}{1}.$$

La grandeur u de Richter a donc pour valeur $-0{,}17$ à $-0{,}14$, c'est-à-dire que la capacité et (d'après Richter) le rendement sont abaissés par l'emploi de l'enroulement supplémentaire. Même si l'on compare la machine à enroulement supplémentaire avec la machine à jonctions résistantes ordinaires, le résultat n'est pas à l'avantage de la première. En effet, un enroulement supplémentaire en cuivre a quatre à sept fois plus de tours qu'une jonction résistante. Le coefficient de remplissage a donc une valeur beaucoup plus défavorable. La jonction résistante ne prend environ que les 2/3 de l'espace nécessaire pour l'enroulement supplémentaire.

3° Richter veut prouver que la bobine supplémentaire n'augmente qu'insensiblement la tension de commutation. Dans les formules (5) à (7), la valeur de e', tension de commutation de la bobine supplémentaire, est prise trop faible. Rigoureusement, on a :

$$\frac{e'}{e} = \frac{u^2 k^2 \gamma^2}{16 p^2} \cdot \frac{\beta + 1}{2\beta^2}.$$

D'après les hypothèses faites par Richter pour β, la formule (7) devrait être

$$\frac{e'}{e} = \frac{u^2 \gamma^2 k^2}{16 \cdot \beta \cdot p^2}.$$

Pour montrer dans un cas particulier que e'/e est petit, Richter prend une machine ayant un très petit γ ($=0{,}62$: toutes les machines normales ont, d'après ses propres indications, $\gamma = 0{,}85$) et un $u = 0{,}1$. Peu après, il prend $u = 0.16$, ce qui est favorable pour le couple. Le nombre de lames de la machine, sur laquelle Richter veut montrer l'influence des bobines supplémentaires sur la tension de commutation, est pris aussi faible que possible, et il obtint $e'/e = 0{,}088$: rigoureusement, ce serait 0,176. Pour une bonne

machine, on aurait à peu près les valeurs suivantes :

$$u = 0{,}1\,; \quad k = 200\,; \quad \gamma = 0{,}85\,;$$
$$\beta = 1{,}8\,; \quad p = 3\,;$$
$$\frac{e'}{e} = \frac{0{,}1^2 \,.\, 0{,}85^2 \,.\, 200^2}{16 \,.\, 9} = \frac{2 + 1{,}8}{2 \,.\, 1{,}8^2} = 0{,}87\,!$$

Donc, dans une bonne machine, la tension de commutation des bobines supplémentaires serait 87 % de la tension de commutation des bobines de l'induit.

Et les enroulements complémentaires ne contribuent en rien à la production d'une f. é. m. pour compenser la tension de court-circuit (f. é. m. statique).

4° Au lieu de jonctions résistantes et d'enroulements résistants (supplémentaires), le transformateur d'excitation employé par Winter et l'auteur ne complique pas la machine, pour maintenir, au démarrage, les pertes sous les balais de travail dans les limites voulues. Les conclusions de Richter sur la consommation de courant pour un couple donné quand on emploie un transformateur d'excitation sont inexactes.

Les kilovoltampères absorbés sont, en première approximation, donnés par les sommes des kilovoltampères magnétisants (c'est-à-dire environ $\mu = 0{,}2$ à $0{,}4$ des kilovoltampères de pleine charge ; cette valeur s'appliquant à des moteurs de traction à grand entrefer et à fréquence élevée) et de la m^e partie des kilovoltampères de pleine charge, quand les enroulements de travail présentent, à pleine tension (Δ) un courant de court-circuit correspondant à m fois le courant de pleine charge J. Pour le couple de pleine charge, il faut, au démarrage,

$$\left(\mu + \frac{1}{m}\right) \cdot J \cdot \Delta \text{ voltampères.}$$

Pour le moteur série, m est un peu plus grand que pour le moteur compensé, parce que les enroulements de travail sont connectés en opposition, tandis que, dans le second, ils sont accouplés inductivement.

Pour les deux types de moteurs, il est inexact d'additionner arithmétiquement u et $1/m$: il faut additionner géométriquement ces grandeurs. On ne tient pas compte de l'influence de la saturation.

Soient j le rapport du nombre de tours du transformateur d'excitation en circuit avec le stator au nombre de tours en circuit avec le rotor, et x le rapport du courant normal d'excitation au courant de travail normal du stator : le couple croît dans le rapport $j/x = \rho$, et le nombre de voltampères est

$$\left(\mu\rho^2 + \frac{1}{m}\right) J \cdot \Delta.$$

Le couple par kilovoltampère croît suivant la forme

$$\frac{\rho}{\mu\rho^2 + \frac{1}{m}} = A.$$

Pour $\mu = 0{,}3$ et $m = 4$, on a :

	A =	1,68	1,81	1,81	1,76	1,66
pour	ρ =	0,6	0,8	1	1,2	1,4.

On voit que le transformateur d'excitation modifie peu le rapport entre les kilovoltampères absorbés et le couple. L'influence sur le nombre de kilowatts absorbés pour un couple donné est négligeable en pratique. Rien n'empêche d'ailleurs de prendre $\rho = 0{,}8$ pour le démarrage, et $\rho = 1$ ou $1{,}2$ pour la marche. Il faut, d'ailleurs, régler aussi la différence de potentiel totale.

Amélioration du facteur de puissance. — Richter indique deux moyens pour améliorer le facteur de puissance : la réaction du courant de court-circuit dans les balais de travail, et un enroulement auxiliaire particulier.

1° Les courants de court-circuit doivent être aussi faibles que possible ou nuls dans un bon moteur à collecteur. En marche, ils échauffent le collecteur ; au démarrage ils provoquent une consommation inadmissible de kilowatts (et de kilovoltampères).

2° L'enroulement supplémentaire pour l'amélioration du facteur de puissance est tout autre que celui employé pour l'amélioration du démarrage. L'un des deux seul peut être employé. Cet enroulement auxiliaire abaisserait aussi la capacité de la machine, n'ajouterait rien au couple, et augmenterait la tension de commutation.

Il n'existe donc pas de moyen pratiquement utilisable pour améliorer le facteur de puissance du moteur série.

Le moteur à répulsion compensé ne possède théoriquement que pour une seule vitesse un $\cos\varphi$ égal à l'unité, mais le facteur de puissance est très voisin de l'unité dans de très larges limites.

A cela s'ajoute aussi que, pour une vitesse déterminée, dépendant de la dispersion et de la répartition de l'enroulement, le courant est décalé en avant. Cela peut être très utile dans de grandes exploitations.

Formation d'étincelles. — La compensation de la tension de court-circuit (f. é. m. statique) exige un champ transversal, perpendiculaire en phase au courant d'excitation, et décroissant quand la vitesse croît et que le courant d'excitation décroît. La tension de commutation ne peut, au contraire, être neutralisée par un champ transversal en phase avec le courant et directement proportionnel à celui-ci.

1° Le premier champ correspond à une tension présentant des variations telles qu'on n'en rencontre dans aucun enroulement du moteur série ou du moteur à répulsion compensé. Si l'on trace les courbes du champ transversal en fonction de la vitesse de rotation pour ce dernier moteur, fonctionnant sous différentes tensions, on voit qu'aux faibles vitesses le champ augmente d'une façon relativement rapide, conserve ensuite une valeur constante, puis tombe un peu quand la tension du réseau reste invariable. La grandeur du champ peut être modifiée par un choix judicieux de la valeur de l'entrefer au point de commutation (par ovalisation de l'alésage du stator). On peut aussi, si l'on veut effectuer un réglage, employer une bobine auxiliaire embrassant la dent et reliée à une partie déterminée, variable ou invariable, de la tension du réseau ou du stator.

Dans le moteur série, il est impossible d'obtenir un champ transversal sans bobine auxiliaire. La première disposition indiquée par Richter ne produit pas de flux transversal rigoureux. J_w est en phase avec le flux transversal et en phase avec la tension aux bornes de l'enroulement compensateur. Mais celle-ci doit (si l'on néglige la dispersion) être déphasée de 90° par rapport au flux transversal, ou à J_w. La seconde disposition indiquée par Richter est aussi inexacte. S'il existe un flux transversal, la différence de potentiel aux bornes de l'induit diminue toujours ; le flux transversal devrait donc diminuer aussi ; les autres dispositifs indiqués par Richter comportent tous une bobine particulière, dont on peut éviter l'emploi dans le moteur à répulsion compensé.

2° La tension de commutation peut être produite par le courant de travail dans le moteur série. Cela semble très simple au premier abord. Richter montre lui-même que, pour obtenir de bons résultats, il ne faut pas recourir aux dispositifs simples qu'il a mentionnés.

Dans le moteur à répulsion compensé, il existe pour cela un moyen théoriquement imparfait et pratiquement tout à fait simple et efficace. Aux vitesses de rotation élevées, on soumet simplement (fig. 3) à la tension de l'induit ou à une

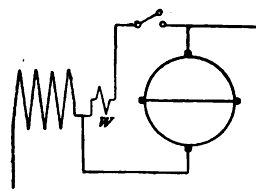


Fig. 3.

portion de celle-ci un enroulement W embrassant la dent de commutation. Aux fortes vitesses de rotation, pour laquelle la tension de commutation atteint une valeur trop élevée et pour laquelle, à cause de la grande vitesse périphérique du collecteur, une commutation parfaite est nécessaire, il faut produire une tension d'excitation déphasée en avant de telle façon que le flux produit dans la dent de commutation soit en phase avec le courant. On peut faire agir sur le circuit de la bobine W une portion de la tension du réseau. Si l'on n'adopte pas cette solution, le courant d'égalisation donne au flux dans la dent une phase et une grandeur à peu près égale à la phase et la grandeur nécessaires. Mais le courant absorbé par l'enroulement de commutation a une valeur un peu plus grande.

3° A la fin du chapitre consacré à la formation des étincelles, Richter indique que les balais d'excitation doivent présenter des crachements par suite de la saturation. Mais le champ transversal ne croît pas indéfiniment. Quand la tension d'excitation est décalée en avant et que le facteur de charge redescend au delà de l'unité, en correspondant à un décalage en avant, la tension du stator diminue et ne croît plus.

Le flux transversal, et avec lui la f. é. m. statique dans les balais d'excitation du moteur à répulsion compensé, est toujours proportionnel au produit du flux et de la vitesse de rotation. Les différences produites par le fait que la répartition du flux d'excitation n'est pas sinusoï-

dale ne sont pas suffisantes pour amener la formation d'étincelles.

Capacité et rendement. — 1° En ce qui concerne l'utilisation des matériaux employés, Richter part de l'hypothèse inexacte que la plus grande induction doit être la même dans les deux moteurs. La différence qu'il en déduit par le calcul n'est pas la différence entre un moteur série et un moteur à répulsion compensé, mais bien la différence entre deux moteurs présentant une répartition différente du flux.

La base rigoureuse de comparaison pour la capacité d'une machine doit être la considération des pertes dans le fer, en tant qu'il s'agit du fer. Ces pertes sont plus petites dans le moteur à répulsion compensé que dans le moteur série, entre de grandes limites de vitesse. Il n'y a donc pas lieu de modifier la forme du champ dans les moteurs de faible et de moyenne puissance. Si l'on veut réaliser cette modification, il y a pour cela deux moyens très simples : d'abord le choix d'une forme de tôles convenable, comme on l'a dit plus haut, ensuite le déplacement des balais d'excitation vers les extrémités d'une corde. Les conclusions de Richter sur la capacité du moteur à répulsion compensé ne sont pas exactes.

2° En étudiant le rendement, Richter néglige les pertes dans les jonctions résistantes et n'envisage pas le cos φ. Mais celui-ci joue un rôle important pour les pertes dans le cuivre des enroulements de travail.

Tandis qu'il n'existe pas de moyen pratiquement utilisable pour amener au voisinage de l'unité la valeur du cos φ d'un moteur série, cela est obtenu sans enroulement auxiliaire dans le moteur à répulsion compensé. Cette diminution des pertes dans le cuivre par suite de l'amélioration du cos φ est un multiple de la diminution des pertes par les courants magnétisants que calcule Richter. Les premières peuvent facilement atteindre 1 à 1,3 %: les secondes ne dépassent pas 0,2 à 0,3 %.

La réunion de l'enroulement excitateur et de l'enroulement de travail entraîne des complications importantes. Il faut des enroulements en barres, et il s'ajoute à l'enroulement principal deux enroulements secondaires, non compris encore les enroulements de commutation. En outre, les encoches qui doivent contenir l'enroulement compensateur et l'enroulement induit doivent présenter beaucoup plus d'espace disponible que les autres encoches. R. V.

ÉCLAIRAGE

Lampes Osram. — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 9 août 1906.

La Société Auer va mettre sur le marché une lampe à filament métallique, dite lampe Osram, qu'elle fabrique industriellement depuis quelques mois. L'intensité lumineuse de ces lampes sera de 32 et 50 bougies et le voltage 100 à 130 volts. La consommation spécifique est voisine de 1 watt par bougie. La durée moyenne d'utilisation sera de 1 000 heures en pratique, la diminution d'intensité lumineuse était à peu près insensible au bout de ce temps. Ces lampes doivent être placées verticalement, la pointe en bas, de préférence, mais peuvent néanmoins fonctionner dans d'autres positions. La consommation spécifique de ces lampes varie très peu avec la durée de fonctionnement, comme l'ont montré plusieurs séries d'essais. Les chiffres suivants sont relatifs à des expériences effectuées à l'institut physicotechnique (Reichanstalt).

Pour l'essai de la durée de fonctionnement, on prit, dans un grand nombre de lampes, 8 lampes de 25 bougies et 8 lampes de 32 bougies et on les examina. L'essai devait avoir lieu sur du courant alternatif du réseau urbain de Charlottembourg : les lampes étaient soumises à toutes les variations de tension de ce réseau. Les lampes de 25 bougies ont été essayées surtout pour voir si le procédé employé se prête à la fabrication de lampes de puissance lumineuse relativement faible, fabrication qui, comme l'on sait, présente toujours de grandes difficultés si l'on veut atteindre des consommations spécifiques aussi basses que dans les lampes de plus grande intensité lumineuse ou de plus faible voltage. On voit, d'après les chiffres du tableau, que les lampes de 25 bougies ne présentent pas une diminution de puissance lumineuse supérieure à 6,3 % en moyenne, et les lampes de 32 bougies une diminution supérieure à 3,6 % en moyenne. Les chiffres extrêmes de la diminution de puissance lumineuse en 1 000 heures sont de 11,4 % et 4,2 % pour les lampes de 25 bougies, et de 6,1 % et 0,6 % pour les lampes de 32 bougies.

La puissance lumineuse des lampes croît pendant les 200 premières heures, puis diminue lentement et revient à sa valeur initiale au bout de 560 heures.

Sur 16 lampes étudiées, 11 fonctionnaient en-

core parfaitement au bout de 1 000 heures d'utilisation : on peut donc compter sur une durée de fonctionnement supérieure à 1 000 heures en moyenne. Les expériences ont montré qu'au point de vue de la durée, il est indifférent que la lampe soit alimentée par du courant continu ou par du courant alternatif: les essais ont été faits sur courant alternatif.

EXPÉRIENCES FAITES SUR LES LAMPES OSRAM

DURÉE DE FONCTIONNEMENT	TENSION MOYENNE Volts.	INTENSITÉ DE COURANT moyenne. Ampères.	INTENSITÉ LUMINEUSE MOYENNE perpendiculairement à l'axe de la lampe. Bougies.	CONSOMMATION SPÉCIFIQUE MOYENNE par bougie. Watts
I. Lampes de 25 bougies environ.				
0,4	117	0,272	28,5	1,11
100	117	0,272	29,6	1,07
200	117	0,271	29,8	1,06
400	117	0,270	28,7	1,11
500	117	0,270	28,1	1,12
700	117	0,270	27,7	1,14
1 000	117	0,269	26,6	1,18
Variation au bout de 1 000 heures . .	»	— 1,1 °/o	— 6,6 °/o	+ 6,3 °/o
Meilleures lampes au bout de 1 000 h. .	117	0,270	27,3	1,10
Plus mauvaises lampes au bout de 1 000 h.	117	0,267	25,7	1,22
II. Lampes de 32 bougies environ.				
0,4	112,75	0,314	31,9	1,10
100	112,75	0,315	33,7	1,06
200	112,75	0,316	33,9	1,04
400	112,75	0,314	33,0	1,07
500	112,75	0,314	32,7	1,08
700	112,75	0,311	31,3	1,12
1 000	112,75	0,309	30,6	1,14
Variation au bout de 1 000 heures. . .	»	— 1,5 °/o	— 4,0 °/o	+ 3,6 °/o
Meilleures lampes au bout de 1 000 h. .	114,0	0,310	32,0	1,10
Plus mauvaises lampes au bout de 1 000 h.	111,5	0,304	29,0	1,17

On a pu parvenir à fabriquer des lampes Osram de 40 bougies fonctionnant d'une façon satisfaisante sur 220 volts : l'intensité lumineuse peut atteindre 200 bougies par lampe. La consommation spécifique est de 1,25 watt par bougie pour les lampes de 40 bougies et de 1 watt par bougie pour les lampes de plus de 75 bougies (220 volts). E. B.

Emploi de lampes à magnétite en série pour l'éclairage public. — **W.-S. Barstow.** — *Elektrotechnik und Maschinenbau*, 12 août 1906.

L'auteur décrit l'installation faite pour l'éclairage public à Portland (Orégon) comprenant 1 200 lampes à arc à magnétite. L'énergie électrique est reçue sous forme de courants triphasés à 10 000 volts : la tension de ces courants est élevée à 18 000 volts et l'énergie électrique est convertie en courant continu à 6 000 volts au moyen de redresseurs à mercure. Le courant continu alimente un certain nombre de groupes de 75 lampes en série : chaque lampe absorbe 320 watts sous 80 volts. L'amorçage des redresseurs à mercure, qui desservent chacun un groupe de 75 lampes, est effectué au moyen de courant alternatif à 115 volts pris sur des bornes auxiliaires. Des réactances sont intercalées dans le circuit alternatif et dans le circuit continu. Le rendement de la double transformation d'énergie est de 88 °/o à pleine charge, 81 °/o à demi-charge et 80 °/o à quart de charge. Par rapport au système précédemment employé (lampes à arc ordinaires de 500 watts et transformation de l'énergie au moyen de moteurs générateurs), on réalise une économie annuelle de 2,25 millions de kilowatts-heure (1).

R. R.

ÉLECTROCHIMIE ET ÉLECTROMÉTALLURGIE

La sidérurgie électrothermique. — **E. Stassano.** — Communication faite au *VIe Congrès de chimie physique*, Rome (*suite*) (2).

Au début de sa communication, le major Stassano disait du rendement thermique des combustibles dans les fours industriels qu'il est très variable et très faible sauf pour les hauts fourneaux où il atteint 70 °/o environ. Mais en

(1) Nous publions *sous toutes réserves* cet extrait de l'article de M. Barstow. Si cette installation fonctionne réellement d'une façon satisfaisante, c'est là un exemple tout à fait remarquable. N. D. L. R.

(2) Voir *Éclairage Électrique*, tome XLVIII, 8 septembre 1906, p. 395.

examinant de près ce rendement maximum on reconnaît facilement qu'il n'est qu'apparent.

En réalité, il faut tenir compte de ce fait que, dans le haut fourneau, on opère, non seulement la réduction du minerai de fer, mais encore celle de la silice, de l'oxyde de manganèse et des autres substances contenues dans le minerai. D'autre part, ces matières, en se mélangeant au fer, lui font perdre la malléabilité et la conductibilité qui le caractérisent, ce qui oblige à soumettre la fonte obtenue à de longues et coûteuses opérations d'affinage. Une partie de la chaleur utilisée dans le haut fourneau ne sert donc qu'à accomplir un véritable travail de Sysiphe.

Il est évident que la fonte produite par le haut fourneau reçoit d'utiles et nombreuses applications et l'emploi de pièces en fonte coulée se généralise de plus en plus, mais si le haut fourneau pouvait produire directement du fer malléable, les nombreuses pièces que l'on établit actuellement en fonte, par raison d'économie, seraient certainement fabriquées en fer ou en acier coulé.

Tandis que tous les autres modèles de fours, utilisés dans l'industrie métallurgique en général et plus particulièrement en sidérurgie, ont un rendement bien inférieur à celui du haut fourneau, puisque, généralement, il ne dépasse pas 20 °/₀, on peut certainement attribuer au four électrique un rendement égal ou supérieur à 50 °/₀.

Les nouveaux procédés fondés sur l'emploi de ces fours pourront amener la grande industrie métallurgique à établir des usines dans les endroits où l'on rencontre des forces motrices hydrauliques en abondance (1), à cette condition que le prix de revient du cheval-an ne dépasse pas 40 francs. Les fours électrothermiques peuvent, en outre, être utilisés avec avantage pour certaines opérations spéciales déterminées, là où n'existent pas de forces motrices hydrauliques, mais où les combustibles fossiles sont abondants ou encore par l'utilisation d'autres combustibles à bon marché, le gaz des hauts fourneaux, par exemple.

* * *

Le major Stassano examine ensuite les résultats obtenus afin de voir jusqu'à quel point les déductions théoriques sur lesquelles sont fondés ses essais ont été confirmées en pratique.

Si l'on connaissait exactement la quantité de chaleur nécessaire pour produire la fusion et porter à une température déterminée l'unité de poids des métaux à préparer, ainsi que celle qu'exigent les différentes sortes de scories que l'on obtient au cours des opérations ; si, d'autre part, on tenait compte des chaleurs de formation des divers composés solides et gazeux que la thermochimie fait connaître, il serait très facile de déterminer exactement le rendement thermique des nouveaux fours qui permettent de mesurer, avec une très grande approximation et à n'importe quel moment, la quantité d'énergie qu'ils consomment.

Malheureusement, les renseignements que l'on possède actuellement sur les chaleurs spécifiques à haute température des différents corps et sur les chaleurs latentes de fusion des métaux et des scories qui se forment au cours des opérations métallurgiques, sont très imparfaits ou manquent totalement.

Il est à souhaiter que ceux qui cultivent la science pure tout en s'intéressant aux besoins de la pratique, arrivent à nous donner les données précises qu'exigent pour progresser les procédés industriels, car on doit se contenter, actuellement, de déterminer le rendement des fours d'après des renseignements peu nombreux et insuffisants.

En utilisant les résultats d'essais calorimétriques que l'on trouve dans les tables de Lunge complétées par Jüptner von Jornstorff (*Die Untersuchung von Feureungs Anlagen*) et qui donnent la quantité de chaleur nécessaire pour porter à 1 200° la température d'un kilogramme de fer, et en construisant la courbe d'après les données de cette table, on peut déterminer approximativement, en continuant cette courbe, la quantité de chaleur nécessaire pour amener le fer à la température de fusion et même au delà. D'autre part, d'après les renseignements fournis par

(1) Jusqu'ici les usines électro-sidérurgiques ne s'établissent, en effet, que dans les pays de houille blanche, mais une installation toute récente mérite d'être signalée : on vient d'élever à Unieux (Loire), aux aciéries Holtzer, un four électrique Keller de 1 000 chevaux. C'est là un fait nouveau intéressant puisqu'il semble démontrer que, même avec l'énergie produite par la combustion du charbon le four électrique, peut être encore employé avec avantage.

Quant au gaz des hauts fourneaux il permet d'obtenir le kilowatt-heure à un prix très bas. N. D. L. R.

Gruner, Ledebour, et quelques autres métallurgistes, on peut déterminer la quantité de chaleur nécessaire pour amener la fusion des scories.

D'après les données ainsi obtenues, on peut admettre qu'il faut 510 calories pour fondre et porter à la température de 1900° un kilogramme de fer, la température de 1900° étant celle à laquelle, en général, on procède à la coulée, afin que le métal soit bien fluide. En ce qui concerne les scories, il faut compter sur 600 calories pour les fondre et les porter à la même température lorsqu'elles sont basiques.

* * *

Au précédent congrès de chimie appliquée, tenu à Berlin en 1903, le Dr Hans Goldschmidt a présenté un rapport (1) dans lequel il a rendu compte des expériences auxquelles il avait assisté, à Darfo, en 1901, en qualité de délégué de l'office impérial des brevets d'Allemagne, afin de déterminer si le type de four Stassano permettait d'obtenir directement du minerai des fers malléables en une seule opération.

Il a constaté qu'en traitant un minerai présentant la composition suivante :

Fe^2O^3	93,020 %
MnO	0,169
SiO^2	3,790
S	0,058
Ph	0,056
CaO,MgO	0,500
H^2O	1,720

on a pu obtenir, en une seule opération, un fer ayant la composition suivante :

Fe	99,764 %
Mn	0,092
Si	traces.
S	0,059
Ph	0,009
C	0,090

et que, pour effectuer cette réduction, la consommation d'énergie électrique avait été d'environ 5 chevaux-heure par kilogramme de métal produit, ce qui équivaut à un rendement thermique d'environ 60 % de l'énergie électrique consommée.

(1) Voir *Éclairage Électrique*, tome XXXVII, 7 novembre 1903, page 228.

A la suite des essais effectués à Darfo, le major Stassano a installé pour le compte du ministère de la Guerre d'Italie, dans les ateliers de construction de l'artillerie, à Turin, un four tournant, destiné à préparer l'acier servant à la fabrication des projectiles d'artillerie, en employant comme matière première des tournures et des riblons de fer et d'acier provenant de diverses usines dépendant du ministère de la Guerre.

Du certificat délivré par l'administration de la Guerre, qui porte sur 38 opérations successives d'affinage de fonte et de riblons, effectuées en marche normale, du 15 au 27 mai 1905, et dont les résultats ont été donnés dans le *Giornale del Forno* que publie cette administration (pages 819, 820), on peut déduire :

1° Que le four produit normalement 2 500 kilogrammes d'acier par jour en affinant de la fonte et en fondant des riblons, avec une perte ne dépassant pas 2 %, quoique la charge comporte 75 % de tournures;

2° Que pour une charge de 600 kilogrammes, il entre au minimum 150 kilogrammes de fonte, pour l'affinage de laquelle on emploie 29 kilogrammes de minerai de fer et 6 kilogrammes de chaux;

3° Que chaque opération nécessite une dépense d'énergie électrique de 850 kilowatts-heure.

Comme la quantité d'énergie électrique dépensée a été mesurée sur le circuit primaire du transformateur alimentant le four, la quantité réellement consommée n'est égale qu'à environ 92 % des 850 kilowatts-heure indiqués, c'est-à-dire à 772 kilowatts-heure, si l'on tient compte des pertes dans le transformateur et dans la canalisation secondaire.

D'après les résultats obtenus dans ces essais et d'après les données déjà indiquées pour évaluer la chaleur nécessaire pour produire la fusion et porter à la température d'environ 1 900° 1 kilogramme de fer et 1 kilogramme de scories, il est possible de déterminer le rendement thermique du nouveau modèle de four. En effet :

Pour fondre et porter à 1 900° 600 kilogrammes de fer, il faut 600 × 510 calories, soit	306 000
Pour fondre environ 10 kilogrammes de scories basiques, il faut 10 × 600 calories, soit	6 000

Report. . . 312 000

Pour réduire l'oxyde de fer contenu dans les 29 kilogrammes de minerai ajoutés à la charge, étant donnée sa composition (¹), il faut $\frac{29 \times 312}{160} \cdot 192 + \frac{29 \times 603}{232} \times 279$ calories, soit. 30 885

Total. 342 885

Comme la quantité d'énergie consommée dans le four, pour chaque opération, est de 772 kilowatts-heure, on a :

$$\frac{772\,000}{735} \times 635{,}3 = 667\,256 \text{ calories,}$$

et le rendement thermique du four est, par conséquent :

$$\frac{342\,885 \times 100}{667\,256} = 51{,}42\ \%.$$

Ce résultat, en apparente contradiction avec celui qui avait été constaté par le Dr Goldschmidt, lors des expériences effectuées à Darfo, est identique, comme on va l'expliquer.

En effet, le four installé à Darfo, qui consommait environ 100 kilowatts, était actionné par du courant alternatif simple et ne comportait, par conséquent, que deux électrodes. Dans les ateliers de l'artillerie, le four est alimenté par une dérivation prise sur une canalisation triphasée et nécessite l'emploi de trois électrodes et, par suite, d'un cylindre réfrigérant de plus qui, naturellement, consomme en pure perte une quantité notable de chaleur, ce qui a pour effet d'abaisser le rendement du four.

Quelques chiffres établissent l'exactitude de ce fait. D'après les mesures nombreuses effectuées journellement pendant le fonctionnement du four, on a constaté que les trois cylindres réfrigérants nécessitaient une consommation de 40 mètres cubes d'eau par 24 heures. A sa sortie des cylindres, l'eau présentait une augmentation de température de 15° environ. Dans ces conditions, les pertes thermiques dues au fonctionnement des cylindres réfrigérants représentent une quantité d'énergie égale à

$$\frac{4\,000 \times 15}{635{,}3} = 904 \text{ chevaux}$$

en 24 heures. Comme le four, durant cette période de temps, consomme environ 200 chevaux pendant 22 heures, puisque, pendant les opérations de charge et de coulée, on interrompt le courant, les pertes thermiques dues aux cylindres réfrigérants sont égales à

$$\frac{904 \times 100}{200 \times 22} = 20{,}5\ \% \text{ environ.}$$

Si, au contraire, le four était alimenté avec du courant alternatif simple, cette perte serait réduite d'environ 7 % et, par conséquent, on obtiendrait le même rendement que celui constaté pour le four qui a fonctionné à Darfo.

Il est évident qu'en augmentant la puissance des fours, cette cause de perte diminuerait rapidement, parce que la quantité d'eau circulant dans les réfrigérants restant constante, la quantité d'énergie passant par chaque électrode augmente et, par conséquent, les pertes sont moindres.

En effet, dans un four d'une puissance de 1 000 chevaux, comportant 6 électrodes, les pertes thermiques dues aux réfrigérants seront, d'après les valeurs déjà trouvées, 904×2, puisqu'il y a 6 électrodes au lieu de 3 ; d'autre part, le four consommera, dans une période de 24 heures, 22×1000 cheval-heure. Donc le pourcentage des pertes sera

$$\frac{904 \times 2 \times 100}{22 \times 1000} = 8{,}2\ \%.$$

* * *

Il est permis de conclure des expériences auxquelles a assisté le Dr Goldschmidt et de celles effectuées aux ateliers de l'artillerie que, dans le four Stassano, il est possible :

1° D'obtenir un rendement thermique supérieur à 50 % de la quantité d'énergie électrique consommée et cela avec des fours de faible puissance où, naturellement, les pertes sont plus grandes ;

2° D'obtenir directement du minerai, en une seule opération, des fers malléables ainsi que des aciers de composition déterminée, en employant un mélange convenable de fonte que l'on affine et de riblons que l'on ond ;

(¹) Le minerai employé avait la composition suivante :

Fe^2O^3	31,200 %	CaO MgO	traces
Fe^3O^4	60,264	S	0,020
MnO	0,125	Ph	0,005
SiO^2	6,200	H^2O combinée	0,320
Al^2O^3	1,800	Pertes	0,066

3° En opérant à l'abri du contact de l'air, d'obtenir le rendement maximum des matières traitées.

Il est donc évident que des résultats analogues pourraient être obtenus dans le traitement d'autres minerais et dans l'affinage de métaux autres que le fer.

* * *

Le major Stassano n'a pas complété son exposé par l'étude des procédés imaginés par d'autres inventeurs. Mais il discute en terminant quelques-unes des conclusions du rapport détaillé, rédigé par la Commission nommée par le gouvernement canadien pour étudier les installations électrométallurgiques existant actuellement en Europe.

Lors de son passage à Turin, la Commission canadienne n'avait pu voir le four Stassano en marche car, faute de matières réfractaires, il n'était pas complètement construit[1].

L'auteur relève deux points des conclusions auxquelles est arrivée la Commission.

Il considère ces deux points comme étant en complet désaccord avec les conséquences logiques et naturelles des faits exposés dans son mémoire et qui ont été constatés, soit au cours des essais de Darfo, par le Dr Goldschmidt, soit par l'administration de la Guerre à la suite du fonctionnement normal du four installé pour son compte.

Dans le deuxième alinéa des conclusions formulées par la Commission canadienne, on lit :

« Dans les conditions actuelles, le four électrique ne peut concurrencer, au point de vue économique, les procédés Siemens et Bessemer en ce qui concerne la fabrication des aciers industriels ; son application industrielle est limitée à la fabrication des aciers de qualité supérieure destinés à certaines applications spéciales. »

Cette assertion ne paraît pas exacte à l'auteur.

M. Harbord, métallurgiste, faisant partie de la Commission canadienne, reconnaît lui-même, dans un rapport spécial, qu'en ce qui concerne la main-d'œuvre et la conduite du four, les dépenses résultant de la fabrication du fer et de l'acier au four électrique, pour l'affinage et la fusion des riblons, sont les mêmes que celles qu'entraîne l'emploi du four Martin.

Par suite, s'il existe une différence entre les dépenses de fabrication au four électrique comparées à celles qu'entraîne l'emploi du four Martin, cette différence ne peut provenir que de la consommation d'énergie électrique par rapport à la consommation de combustible et du degré d'utilisation des matières premières qui peut différer dans les deux systèmes de four utilisés.

Il est facile d'évaluer cette différence en établissant une comparaison entre un four Martin de puissance moyenne pouvant produire de 10 à 12 tonnes par opération et un four électrique de 1 000 chevaux, puissance moyenne de ces sortes de four.

On peut admettre que, dans le four Martin, les pertes de matières premières soient seulement de 10 %, ce qui certainement n'est pas exagéré et que, dans le four électrique, ces pertes ne soient que de 2 %, ce qui a été constaté dans le four en fonctionnement à Turin. Supposons, en outre, que, dans un four électrique de 1 000 chevaux, la consommation d'énergie électrique soit proportionnelle à celle qui a été constatée dans le four fonctionnant à Turin, qui n'a qu'une puissance de 200 chevaux. Comme on le voit, nous nous plaçons dans des conditions défavorables pour le four électrique

Dans ces conditions, les dépenses nécessitées pour opérer la fusion d'une tonne de matières dans le four électrique peuvent être évaluées à 10 fr. 35, savoir :

1 300 kw-heure à 0 fr. 005 le ch-heure. .	8 fr. 85
5 kilogrammes d'électrodes à 0 fr. 30 . .	1 fr. 50
	10 fr. 35

Dans le four Martin, il faut faire entrer en ligne de compte le prix du charbon nécessaire pour produire une tonne de produit et celui de

---

(1) La mission canadienne, constituée en décembre 1903, sous la direction de M. Eug. Haanel, superintendant des mines du Canada, se composait de MM. Brown, ingénieur à la « Canadian General Electric Company » de Peterborough (Ontario) ; Harbord, métallurgiste ; Nystrom, dessinateur, Côté, secrétaire. Cette mission a visité, en 1904, les aciéries de Gysinge et Kortfors, en Suède ; les usines électrométallurgiques de La Praz et Livet, en France, Turin, en Italie. Son rapport, déposé le 1er août 1904 au ministère de l'Intérieur du Canada, a été récemment traduit en français par les soins de ce ministère.

N. D. L. R.

80 kilogrammes de matières premières qui, comme on l'a déjà dit, sont perdues. Par conséquent, si des 10 fr. 35 représentant les frais de fusion au four électrique, l'on déduit la valeur de 80 kilogrammes de matières premières à raison de 7 francs par 100 kilogrammes, on a pour comparer les frais de fabrication par les deux procédés, à tenir compte du prix du combustible nécessaire pour opérer la fusion d'une tonne d'acier au four Martin. Or, dans le four électrique, par suite de la perte de matières premières dans le four Martin, la dépense est réduite à 10 fr. 35 — 5 fr. 60 = 4 fr. 75.

Il faut compter pour le four Martin de la puissance indiquée une consommation de combustible qui ne peut être inférieure à 400 kilogrammes par tonne d'acier ; pour obtenir un bon résultat, il faut employer du charbon coûtant, au minimum, 11 fr. 60 la tonne, prix qui certainement n'est pas exagéré, même dans les localités où la houille est abondante ; il s'ensuit que la dépense de combustible est de 4 fr. 64.

Dans le procédé Bessemer, on obtient des résultats analogues à ceux du procédé Martin, surtout si l'on tient compte de ce fait qu'avec le four électrique on peut employer des matières premières de faible valeur, tout en obtenant un bon résultat, tandis que, dans le procédé Bessemer, il est indispensable d'employer des fontes de toute première qualité et l'on constate une perte variant de 10 à 15 %.

La deuxième conclusion, pour laquelle l'auteur n'est pas d'accord avec la Commission, est celle qui a trait à la fabrication de la fonte au four électrique.

En effet, étant admis que l'avantage essentiel que présentent les procédés électrothermiques est de permettre d'obtenir directement des fers malléables en une seule opération, comme l'ont prouvé les expériences effectuées, soigneusement contrôlées, toutes les conclusions de la Commission à ce sujet, sont infirmées. Il ne faut pas perdre de vue que la production de la fonte est une nécessité imposée par les moyens de fabrication dont disposait l'industrie jusqu'à ce jour et que l'obligation de passer par ce produit intermédiaire disparaît grâce à l'emploi du four électrique.

Pour conclure, il semble possible d'affirmer que si les nouveaux procédés électrothermiques n'ont pas encore reçu le grand développement qu'ils étaient en droit d'espérer, cela ne tient pas à des imperfections ou des difficultés, mais à l'opposition que rencontrent les nouvelles inventions, précisément à cause de leur nouveauté qui éveille les défiances, ou encore à cause de l'hostilité naturelle des industriels qui utilisent les anciens procédés [1].

En terminant sa communication, le major Stassano déclare que cette nouvelle industrie est maintenant sortie de la période des essais et qu'elle peut entrer avec profit dans celle des applications pratiques parce que :

1° L'atmosphère dans laquelle s'effectue la transformation de l'énergie électrique en énergie thermique est à l'abri de l'action directe de l'air et est, par conséquent, absolument neutre au point de vue chimique ;

2° La chaleur développée par cette transformation permet d'obtenir la température la plus élevée ;

3° Les matières traitées ne sont pas en contact avec des subtances étrangères susceptibles de modifier leur composition d'une façon désavantageuse ;

---

(1) Cette hostilité tend à disparaître et les métallurgistes utiliseront bientôt dans les usines anciennes les procédés de l'électrométallurgie. C'est ainsi que l'usine de Courtepin (Suisse) où existe cependant tout le matériel nécessaire pour la fusion de l'acier et la forge utilise 4 000 chevaux à la fabrication électrique des alliages.

D'ailleurs, comme le faisait remarquer récemment M. Pitaval :

« L'usine métallurgique, avec ses installations et appareils déjà existants, permettra l'édification des fours électriques avec un minimum de première installation et les produits obtenus bénéficieront d'un minimum de prix de revient des matières premières qui peuvent, du reste, être utilisées fluides et fondues.

« Quel que soit le procédé considéré et qu'elle que soit la matière employée, on trouve dans l'usine métallurgique ordinaire tout l'outillage nécessaire à l'affinage électrique et il suffit d'introduire dans ces établissements, avec le courant électrique, quelques paires d'électrodes pour transformer l'usine la plus ancienne et la plus routinière en une aciérie électrique moderne.

« La main-d'œuvre même n'a pas besoin d'être modifiée. Un apprentissage de quelques jours suffit pour l'appliquer au procédé nouveau. La fabrication de l'acier au four électrique ne diffère pas sensiblement, en effet, de la méthode ordinaire au creuset ou au Martin, la différence réside surtout dans la qualité des produits obtenus. »

On a vu que la Loire était entrée dans cette voie à Unieux, l'exemple de cette usine sera suivi par d'autres ; quelques projets sont actellement à l'étude et ils visent la fabrication beaucoup plus puissante d'une catégorie d'aciers mi-fins à forts tonnages. N. D. L. R,

4° Enfin, les appareils dans lesquels doivent s'effectuer les diverses opérations métallurgiques à l'aide de la chaleur produite par l'énergie électrique et les procédés qui en découlent pour obtenir les produits voulus, sont construits et étudiés pour permettre un fonctionnement continu et toujours à pleine charge.

A. S.

***Électrolyse de solutions diluées d'acides ou d'alcalis à de faibles potentiels. — Dissolution du platine à l'anode avec du courant continu.*— G. Senter.** — *The Electrician*, 20 juillet 1906.

Au cours d'expériences faites au laboratoire de Nernst, différentes observations ont amené à conclure que, quand l'oxygène est amené en contact avec une électrode de platine dans une solution acide ou alcaline, il se forme, en très faible quantité, une substance oxydante. La question s'est alors posée de savoir s'il se forme, dans certaines conditions, un agent oxydant quand des solutions acides ou alcalines sont maintenues en contact avec l'air en l'absence de platine. Les résultats contradictoires obtenus par différents expérimentateurs ont amené l'auteur à étudier les modifications produites à l'anode par l'électrolyse à bas potentiel. Un grand nombre d'électrolyses avec des acides ou des alcalis dilués furent faites à des potentiels inférieurs à celui pour lequel il se dégage de l'oxygène gazeux (— 1,66 volts, en prenant comme zéro le potentiel d'une électrode d'hydrogène dans l'acide normal) et l'on trouve que, dans ces circonstances, il se produit à l'anode de très faibles quantités d'une substance oxydante. Cette substance n'est pas de l'eau oxygénée. Il n'est pas certain, à priori, mais il est très probable que l'agent oxydant est le même que celui observé antérieurement par Wilsmore et Bose [1] : les conditions, dans le cas présent, diffèrent en ce que l'oxygène est engendré en contact avec la solution à une pression de plusieurs centaines d'atmosphères correspondant au potentiel employé, au lieu de passer à la pression atmosphérique. En outre, dans ces expériences, on constata qu'un peu de platine était dissous de l'anode pendant l'électrolyse d'acide sulfurique dilué, quoique l'intensité du courant continu employé fût très faible.

L'appareil employé dans les expériences de l'auteur consistait essentiellement en deux tubes cylindriques de 4 centimètres de diamètre environ et de 50 centimètres cubes de capacité joints à leur extrémité inférieure par un tube capillaire. Au milieu de ce tube était un robinet à trois voies au moyen duquel on pouvait vider séparément les compartiments de l'anode et de la cathode. Le compartiment de l'anode était relié à un petit tube cylindrique dans lequel on pouvait placer une électrode d'hydrogène. Une batterie d'accumulateurs était fermée sur une résistance réglable formant potentiomètre, sur laquelle on pouvait prendre en dérivation une différence de potentiel quelconque pour produire l'électrolyse. Une électrode en platine platiné de 3×4 centimètres était employée comme cathode ; l'anode, en platine non platiné, avait une surface de 170 centimètres carrés et était roulée sur un support de verre de façon à présenter la plus grande surface active possible. La différence de potentiel entre l'anode et l'électrode d'hydrogène était déterminée par une méthode de conpensation : un galvanomètre sensible était employé comme appareil de zéro. Le courant passant dans la cuve électrolytique était mesuré au moyen d'un galvanomètre à miroir : une division de l'échelle correspondait à 4×10^{-8} ampère. Pour effectuer une expérience, on remplissait tout l'appareil avec la solution à électrolyser, les deux robinets fermés, et on faisait passer de l'hydrogène pur dans le petit compartiment pendant un temps suffisamment long pour que le potentiel eût atteint une valeur constante. Le courant était ensuite envoyé dans l'appareil, et l'on faisait, à intervalles de temps égaux, des lectures simultanées du potentiel de l'anode et de l'intensité du courant. Le potentiel d'une électrode de platine exposée à l'air est approximativement de 0,9 volts, si l'on prend comme zéro le potentiel de l'électrode d'hydrogène. Dans tous les cas, on trouva qu'une intensité de courant relativement importante traverse l'appareil. Ce courant diminuait graduellement d'intensité, et, en même temps, le potentiel de l'anode augmentait rapidement d'abord, puis plus lentement, pour attein-

(1) Ces expérimentateurs, au cours de leurs observations sur les potentiels de concentration, avaient trouvé que, après que l'oxygène a traversé pendant quelque temps la solution de l'anode (qui était en platine platiné), il se forme dans la solution un agent oxydant. Ils ont considéré que cet agent était de l'eau oxygénée. Le potentiel d'oxydation était augmenté par la formation de cet agent oxydant.

dre finalement une valeur constante. La différence de potentiel appliquée était réglée de façon que le potentiel de l'anode atteignît une valeur finale de — 1,4 — 1,55 volts : ce potentiel, ainsi que l'intensité de courant, restait constante pendant plusieurs jours. A la fin de l'électrolyse, les solutions de l'anode et de la cathode étaient recueillies séparément et analysées.

De nombreuses expériences furent faites sur de l'acide normal avec la méthode indiquée. La valeur moyenne du courant était de 5×10^{-5} ampères environ, et la densité de courant $1,5 \, . \, 10^{-7}$ ampères par centimètre carré (en comptant les deux faces de l'électrode). Au bout de quatre ou cinq jours, dans la majorité des cas, les solutions anodique et cathodique étaient essayées séparément avec de l'iodure de zinc. Généralement une faible quantité d'iode se trouvait libérée, montrant ainsi que les traces d'une substance oxydante s'étaient formées. La nature de cette substance est difficile à déterminer à cause des faibles quantités produites, même lors d'une électrolyse prolongée. Dans les mêmes conditions, la solution cathodique présentait les mêmes propriétés, mais à un bien plus faible degré. Au bout d'un temps considérable, on constatait que du platine de l'anode était dissous et formait de l'iodure de platine.

Des expériences furent faites avec une solution de soude. On constata la même formation d'un agent oxydant, mais on ne trouva pas de dissolution du platine.

L'auteur a cherché à déterminer la nature de l'agent oxydant. Il a trouvé que ce n'est pas de l'eau oxygénée comme l'avaient cru précédemment plusieurs expérimentateurs. Cette substance oxydante est très stable, particulièrement dans les solutions alcalines, et n'est pas détruite par l'ébullition.

R. R.

Sur la galvanisation électrique. — *The Electrician*, 20 juillet 1906.

L'importance qu'il y a à découvrir les défauts dans les tubes de chaudières avant que ceux-ci aient été montés et essayés a, depuis longtemps, attiré l'attention de l'amirauté anglaise. On a reconnu que l'emploi d'un zincage, déposé par galvanoplastie, facilite énormément l'inspection des tubes en décelant les défauts et les fissures que l'on ne peut pas découvrir autrement. L'électrogalvanisation est employée maintenant sur une grande échelle et est très supérieure à la galvanisation à chaud dans beaucoup de cas. Les progrès faits par cette industrie en Angleterre et en Allemagne ont été très rapides.

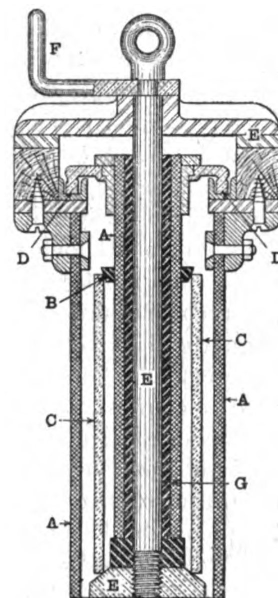


Fig. 1.

Les tubes de chaudières et d'économiseurs reçoivent intérieurement et extérieurement une couche de zinc : il en est de même des tubes de condenseurs. La figure 1 représente l'électrode compound généralement employée. A représente les anodes extérieure et intérieure ; C le tube que l'on doit recouvrir d'un dépôt de zinc ; B un cône isolant servant à centrer l'anode intérieure ; D un godet circulaire avec contact en mercure pour l'anode intérieure ; E la connexion négative du tube : F une manivelle permettant de faire tourner le tube sur lui-même pendant l'opération ; G un cylindre isolant. Quand on emploie des anodes en zinc, une faible portion seulement de celles-ci se dissout : la majeure partie s'émiette et tombe. L'adoption d'un filtre empêche la perte du zinc qui se dissout ainsi graduellement ; en outre, la solution ne contient pas de particules solides en suspension, ce qui est avantageux pour l'obtention d'un bon dépôt.

R. R.

MESURES

***Mesure de la résistance des charbons au moyen de deux contacts en mercure.* — J. Kuhn.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 12 juillet 1906.

La qualité des charbons servant aux usages électriques dépend beaucoup de leur résistance électrique et il est important de pouvoir déterminer celle-ci d'une façon simple avec une exactitude suffisante. La difficulté principale provient de la réalisation d'un bon contact entre les extrémités du charbon à étudier et les fils de jonc-

tion aboutissant aux appareils de mesure. Les résistances de contact inévitables influent beaucoup sur le résultat des mesures : pour les éliminer, on peut faire une double mesure avec deux longueurs différentes des charbons à étudier. On peut obtenir de bons résultats dans ces mesures en employant des contacts en mercure, comme le montre l'auteur.

La baguette de charbon est placée verticalement : la partie inférieure plonge dans un godet à mercure et la partie supérieure reçoit une rondelle en caoutchouc formant le fond d'un récipient conique dans lequel on place le mercure qui recouvre alors l'extrémité supérieure de la baguette. Une tige verticale porte deux curseurs à plateaux sur lesquels sont posés les fils amenant le courant au mercure de deux godets : le curseur supérieur soutient, en outre, le godet conique à mercure. La tige verticale est graduée en millimètres, ce qui permet de déterminer la longueur de la baguette de charbon dont on mesure la résistance.

La meilleure méthode de mesure à appliquer avec ce dispositif est celle du pont de Wheatstone. On place d'abord le curseur supérieur de telle façon que l'extrémité inférieure du charbon ne plonge que peu dans le mercure. Ensuite, on amène le curseur inférieur dans une position telle que la pointe du fil d'amenée du courant vienne juste en contact avec le mercure. Soit L_1 la longueur de la baguette comprise entre les deux contacts, l_1 la distance entre les parties inférieures des deux curseurs, a et b les distances entre ces parties et le niveau inférieur (godet supérieur) ou supérieur (godet inférieur) du mercure. On a :

$$L_1 + b = l_1 + a \text{ ou } L_1 = l_1 + a - b \qquad (1)$$

La résistance mesurée w contient les résistances des fils d'amenée du courant et les résistances de contact. On prend, en déplaçant le curseur supérieur, une autre longueur de baguette L_2 : en répétant la manœuvre précédente on a

$$L_2 = l_2 + a - b \qquad (2)$$

La valeur $w_1 - w_2$ représente la distance exacte de la longueur de baguette $L_1 - L_2$. Celle-ci est égale aussi à $l_1 - l_2$: il suffit donc de lire sur la tige graduée. Ceci n'est vrai qu'à la condition que les résistances de passage restent les mêmes, bien entendu. Pour étudier l'influence possible que pourrait exercer, sur la résistance de passage, l'augmentation de la surface de contact du charbon avec le mercure, l'auteur fit une mesure en enfonçant profondément la baguette de charbon dans le mercure et trouva une résistance de 0,1199 ohm. La baguette fut alors soulevée de façon à plonger très peu dans le mercure. La mesure donne comme valeur de la résistance 0,1196 ohm, valeur qui diffère seulement de 0,03 °/₀ de la précédente. Cette différence est si faible qu'on doit la négliger.

Il était intéressant de comparer les résultats obtenus avec cette méthode avec les résultats de mesure de la résistance du charbon obtenus avec des contacts d'un autre genre. Dans ce but, on fit une série de mesures de charbons homogènes de 9 millimètres de diamètre. Les résistances furent mesurées au moyen d'un pont de Wheatstone et Kirchhoff avec une résistance étalon et un galvanomètre à miroir de Wiedemann. Les baguettes à essayer furent d'abord étudiées au moyen du pont spécial de Hartmann et Braun et présentèrent des valeurs élevées de la résistance. Par exemple, une baguette mesurée au moyen de la méthode avec godets à mercure présenta une résistance de 47,567 ohms, et, mesurée avec le pont de Hartmann et Braun, une résistance de 54,528 ohms. Après avoir déterminé la résistance des deux baguettes, on entoura les extrémités de l'une d'elles d'un alliage facilement fusible, et les extrémités de l'autre, d'un dépôt galvanique de cuivre, puis on détermina à nouveau la résistance de ces baguettes : on trouva que la résistance spécifique des baguettes munies de têtes métalliques était de 48,840 ohms, tandis que la valeur de la résistance spécifique précédemment trouvée avec la méthode des godets à mercure était de 48,849 ohms. La concordance est donc très satisfaisante.

Un certain nombre d'essais ont montré à l'auteur que l'emploi de revêtements métalliques des extrémités des baguettes conduit à des résultats très variables, à cause de la longueur plus ou moins grande de ces revêtements qui intervient dans la résistance totale et fausse les résultats de mesure. A ce point de vue donc encore, la méthode avec godets à mercure doit être préférée aux anciennes méthodes. En outre le cuivrage des extrémités est une opération assez longue.

E. B.

***Petit électromètre sensible.* — Paschen.** — *Physikalische Zeitschrift,* 15 juillet 1906.

L'auteur a établi depuis quelques années un petit électromètre qui présente une grande sensibilité, une faible capacité et s'applique à beaucoup de mesures.

Dans les électromètres à quadrants ordinaires, on n'obtient pas le couple maximum possible sur l'aiguille : on sacrifie beaucoup de choses pour arriver à un dispositif pour lequel les relations théoriques entre le potentiel et l'angle de torsion soient exactement remplies. Dans l'appareil construit par l'auteur, les forces électriques sont mieux utilisées et l'on ne s'est pas préoccupé de savoir si les déviations seraient exactement proportionnelles aux différences de potentiel ni à leurs carrés. Mais il est facile, dans tout appareil de mesure, de déterminer avec une exactitude suffisante la relation nécessaire. Cet étalonnage est d'ailleurs inévitable, même avec les électromètres exacts à quadrants. Il s'est trouvé que, contrairement aux prévisions, les mêmes conditions sont remplies avec presque autant d'exactitude que dans les meilleurs électromètres construits sur des données théoriques.

Entre des quadrants cylindriques en cuivre de 9 millimètres environ de diamètre intérieur et 3 centimètres de hauteur est suspendue une feuille plate de cuivre laminé extrêmement mince d'environ 6 millimètres de largeur et 12 millimètres de longueur exactement parallèle à l'axe du cylindre et dont le plan est exactement dans le plan de deux fentes opposées faites dans le cylindre. Les quadrants cylindriques, montés sur de l'ambre, sont dans une enveloppe cuivrée intérieurement, dont le couvercle mobile porte un tube métallique portant la suspension. Le tube porte en haut une tête de torsion à déplacement micrométrique et en bas une fenêtre permettant de découvrir le miroir. La feuille de cuivre est suspendue à un fil de Wollaston de 5 à 6 μ de diamètre et d'environ 12 centimètres de longueur. Ce fil est tenu par une tige fixée dans le bouton de torsion par l'intermédiaire d'une enveloppe isolante en ambre ; la tige porte une borne à sa partie supérieure. Un petit miroir, pesant 5 milligrammes, est collé sur un fil de cuivre mince placé dans l'axe de la feuille de cuivre mobile.

Celle-ci est obtenue par laminage jusqu'à une épaisseur de $0^{mm},01$, puis portée à l'incandescence et laminée entre des rouleaux de carton très lisse qui la rendent tout à fait unie. Les quadrants sont reliés à deux fils traversant l'enveloppe métallique dans des tubes d'ambre. L'intérieur de l'enveloppe métallique contient, comme seul diélectrique, la plaque d'ambre qui porte les quadrants cylindriques. Celle-ci est munie d'un trou rond circulaire prolongeant l'alésage des quadrants cylindriques, de sorte qu'en aucun point de la plaque on n'aperçoit le diélectrique. De même, vers le haut, on ne voit d'aucun point de la plaque autre chose que du métal ayant un potentiel bien défini.

Pour la mise en place de la plaque, l'enveloppe porte une fenêtre fermée par une bague cuivrée à l'intérieur. Avec l'aide de cette fenêtre, des vis de calage et de la vis micrométrique du bouton de torsion, on fait un réglage rapide de façon que les déviations soient égales à droite et à gauche pour chaque montage. Les déviations sont alors presque exactement proportionnelles aux carrés de la différence de potentiel pour le montage double, et aux différences de potentiel elles-mêmes pour les autres montages.

La sensibilité a été trouvée égale à 32 millimètres environ par volt (déviation simple) pour une distance de l'échelle de 2 mètres et le montage double. Pour le montage avec quadrants reliés et aiguille chargée au potentiel de 40 volts, une déviation de 1 millimètre correspond à 1×10^{-4} volt (déviation simple).

La capacité d'un quadrant est de 15 centimètres environ, les autres parties enlevées.

La capacité de l'aiguille est de 8 centimètres environ, les autres parties enlevées.

Ces capacités peuvent être encore réduites.

La durée totale d'oscillation est de 15 secondes.

Ce modèle, établi pour des essais de principe, a des dimensions relativement grandes. On pourrait diminuer sensiblement encore ces dimensions et obtenir ainsi une plus grande sensibilité pour une même période d'oscillations.

E. B.

***Watt-heures-mètres système Stanley.* — Faccioli.** — *Electrical World.*

Cet appareil est composé essentiellement d'un électro-aimant rectangulaire dont un des côtés

longitudinaux porte une bobine et dont l'autre côté est interrompu par un entrefer dans lequel passe un disque en aluminium. Un fer à cheval en acier doux embrasse le disque. Quand la bobine de l'électro-aimant est parcourue par un courant alternatif, des courants de Foucault sont engendrés dans le disque. Ceux-ci ne produisent pas de couple avec le flux de l'électro-aimant, parce que le dispositif est symétrique et qu'il en résulte des forces égales et opposées, mais le fer à cheval en fer doux réduit sur un côté la réluctance et provoque une dissymétrie qui entraîne la rotation du disque. Le couple est proportionnel au courant dans le disque et au flux induit dans le fer à cheval en fer doux, c'est-à-dire est proportionnel au carré du courant. L'électro-aimant porte deux enroulements, un enroulement série et un enroulement dérivé. Dans les appareils employés en pratique, il existe deux moteurs superposés dont les disques sont calés sur le même arbre. Dans l'un d'eux, les actions du courant et de la tension s'ajoutent. Dans l'autre, elles se retranchent. Les couples sont opposés et le couple résultant est proportionnel à $EI \cos \varphi$. L'enroulement dérivé (bobine de tension) est fortement inductif. Pour compenser le décalage qui en résulte, on place une résistance non inductive en dérivation sur la bobine série. Le compteur est indépendant de la fréquence entre certaines limites. Le freinage est assuré par une paire d'aimants permanents.

R. R.

***Méthode pour mesurer la résistance de passage d'une prise de terre.* — A. Christenson.** — *Elektrotechnik und Maschinenbau.*

L'auteur décrit un montage de pont qui permet de déterminer la résistance de passage d'une prise de terre. La figure 1 représente le montage adopté. R est la résistance de passage

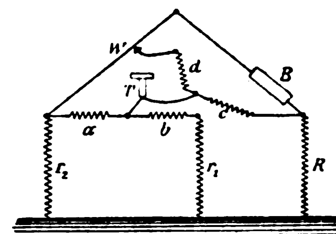


Fig. 1.

cherchée ; r_1 et r_2 les résistances dans les deux dérivations auxiliaires. Quatre résistances de valeur relativement élevées et égales entre elles $a, b, c, d,$ forment, en connexion avec la résistance variable W, la source de courant B et le téléphone T, une combinaison de pont.

Quand la résistance variable W est réglée de façon que le téléphone ne soit parcouru par aucun courant, on a la relation

$$R + r_1 \frac{J_b}{J_R} = W.$$

On voit sur la figure que les intensités de courant J_b et J_R sont inversement proportionnelles aux résistances, et, comme R et r_1 sont relativement faibles, on peut, en donnant à b une valeur suffisamment grande, poser ave une approximation suffisante $R = W$. L'étendue de l'échelle des mesures peut être amplifiée x fois si l'on choisit le rapport

$$a/b = c/d = x.$$

E. B.

CHARTRES. — IMPRIMERIE DURAND, RUE FULBERT. *Le Gérant :* J.-B. NOURY.

Tome XLVIII. Samedi 22 Septembre 1906. 13e Année. — N° 38.

L'Éclairage Électrique

REVUE HEBDOMADAIRE DES TRANSFORMATIONS

Electriques — Mécaniques — Thermiques

DE

L'ÉNERGIE

ÉTUDE DU DÉMARRAGE D'UN APPAREIL DE LEVAGE ENTRAINÉ PAR UN MOTEUR ÉLECTRIQUE A COURANT CONTINU

DÉTERMINATION DU RHÉOSTAT

La méthode simple, habituellement employée pour déterminer les résistances successives d'un rhéostat de démarrage à plots, est suffisamment connue ; il est inutile de la rappeler ici dans ses détails.

Toutefois, avant d'exposer pourquoi cette méthode conduit parfois à des résultats peu conformes à la théorie, nous rappellerons en quelques mots les formules en usage.

Dans le cas où l'on considère un moteur à courant continu, ayant à vaincre un couple résistant constant (cas des appareils de levage), les formules qui donnent les résistances successives d'un rhéostat sont les suivantes :

Nous supposons qu'en passant d'une touche à une autre, on laisse à l'intensité le temps de reprendre sa valeur normale et nous appelons :

E le voltage du réseau.

I_n l'intensité normale du courant absorbé par le moteur.

α le rapport supposé constant entre l'intensité maxima au moment de l'à-coup et l'intensité normale.

$R_1, R_2..., R_n$ les résistances successives totales (rhéostat et induit compris).

On a :

$$R_1 = \frac{E}{\alpha I_n}$$

et successivement

$$\alpha R_2 = R_1$$

$$\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot$$

$$\alpha R_n = R_{n-1}$$

jusqu'à ce qu'on ait :

$$\alpha \rho = R_n,$$

ρ étant la résistance de l'induit.

Dans ce cas simple, si on multiplie toutes les égalités ci-dessus membre à membre, on obtient :

$$\alpha^{n+1} = \frac{E}{\rho I_n}$$

et si on pose

$$\rho I_n = vE$$

le nombre des touches du rhéostat $n + 1$ est donné par la formule :

$$n + 1 = \frac{\log \frac{1}{v}}{\log \alpha}.$$

La solution graphique de ce problème se comprend d'elle-même à la seule inspection de la figure 1.

La solution du problème, plus compliqué analytiquement, dans lequel le couple résistant et par suite l'intensité du courant varie avec la vitesse, c'est-à-dire avec la position de la manette du rhéostat et dans lequel d'autre part le rapport α peut varier d'un plot à un autre, est également très simple en adoptant la méthode graphique comme on peut s'en rendre compte par la figure 2.

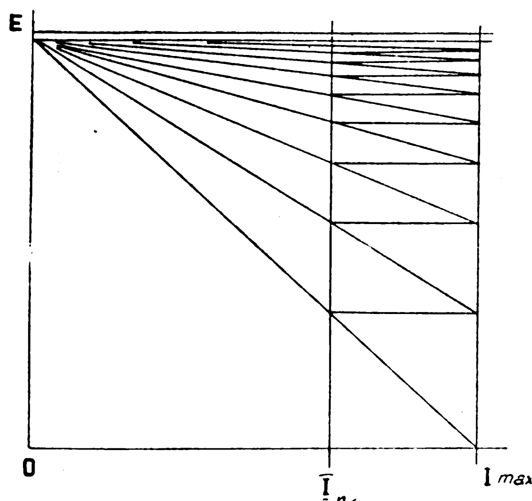


Fig. 1.

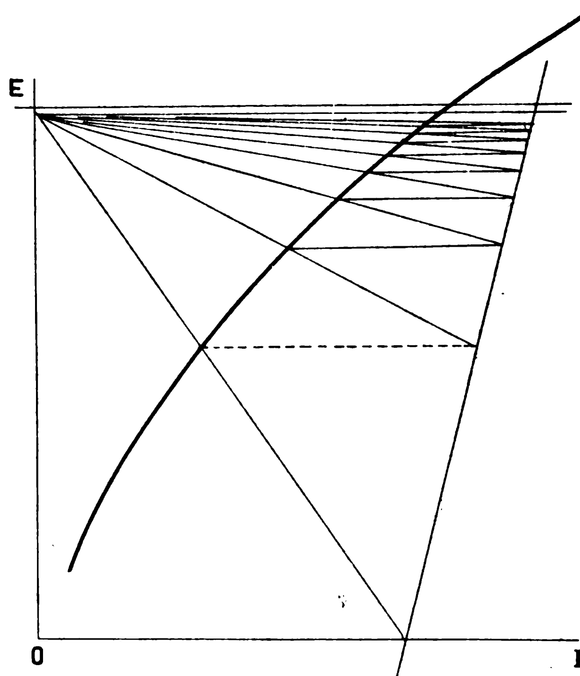


Fig. 2.

Mais cette méthode simple, soit analytique, soit graphique, très suffisante, il est vrai, dans

beaucoup de cas, présente l'inconvénient de ne pas tenir compte de la self-induction du moteur.

Il en résulte que l'à-coup réel à chaque passage d'une touche à une autre est différent de l'à-coup prévu.

Cet à-coup sera notablement réduit, ainsi que nous allons le montrer, et d'autant plus qu'on s'approchera de la vitesse normale du moteur ; une étude plus approfondie du phénomène de démarrage conduira donc, si l'on veut conserver sur chaque plot la même valeur du courant maximum, ce qui revient à faire travailler chaque plot également, à réduire le nombre de ces plots.

(Dans tout ce qui précède et dans tout ce qui va suivre, on a supposé le flux Φ du moteur constant.)

Soient :

E le voltage du réseau.

R la résistance variable branchée aux bornes d'alimentation et comprenant la résistance du rhéostat (variable) et celle de l'induit du moteur.

L le coefficient de self-induction du moteur.

I_n le courant normal.

I le courant variable.

P le poids à soulever.

ω la vitesse angulaire variable de l'arbre moteur.

MK^2 le moment d'inertie de tous les organes tournants rapporté à l'arbre de l'induit.

η le rendement de l'ensemble du système, moteur excepté.

Nous pouvons écrire les deux équations suivantes :

$$E - \frac{c}{2\pi}\omega\Phi = RI + L\frac{dI}{dt} \qquad (1)$$

dans laquelle $c = np$, n étant le nombre des fils périphériques, et p le nombre de paires de pôles.

Ecrivons au temps t l'égalité des travaux élémentaires, moteur et résistant, pendant le temps dt.

$$C\omega dt = \frac{Pk\omega dt}{\eta} + \omega d\omega\left(MK^2 + \frac{P}{g}k^2\right) \qquad (2)$$

dans laquelle

$$C = \text{couple moteur} = \frac{c}{2\pi}\Phi I\ ; \qquad k = R\frac{N'}{N},$$

R étant le rayon du tambour de l'appareil de levage.

N' le nombre de tours du tambour de l'appareil de levage.

N le nombre de tours de l'induit.

L'équation (2) peut s'écrire :

$$\frac{c}{2\pi}\Phi I dt = P'k dt + d\omega\left(MK^2 + \frac{P}{g}k^2\right) \qquad (2')$$

$$\text{ou } P' = \frac{P}{\eta}.$$

Différenciant (1), on a

$$-\frac{c}{2\pi}\Phi d\omega = R dI + L\frac{d^2I}{dt^2}dt.$$

L'équation (2) devient alors, après substitution, l'équation différentielle définitive du démarrage :

$$\frac{c}{2\pi}\Phi I dt = P'k dt - \frac{2\pi}{c\Phi}\left(MK^2 + \frac{P}{g}k^2\right)\left(R dI + L\frac{d^2I}{dt^2}dt\right).$$

En posant

$$\frac{2\pi}{c\Phi}(MK^2 + \frac{P}{g}k^2) = \Lambda$$

elle devient enfin

$$\frac{d^2I}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{dI}{dt} + \frac{c\Phi}{2\pi}\frac{I}{\Lambda L} = \frac{P'k}{\Lambda L}. \qquad (3)$$

En intégrant cette équation, on obtient :

$$I = \frac{P'k}{\frac{c\Phi}{2\pi}} + Me^{m_1 t} + Ne^{m_2 t} \qquad (4)$$

ou bien

$$I = \frac{P'k}{\frac{c\Phi}{2\pi}} + e^{at}(G\cos bt + G'\sin bt). \qquad (4')$$

suivant que les racines m_1, m_2 de l'équation

$$m^2 + \frac{R}{L}m + \frac{c\Phi}{2\pi}\frac{1}{\Lambda L} = 0 \qquad (5)$$

sont réelles ou imaginaires.

Nota. — 1° Dans les 2 équations (4) et (4')

$$\frac{P'k}{\frac{c\Phi}{2\pi}} = I_n.$$

2° L'équation (5) nous donne :

$$m = \left[\frac{1}{2} - \frac{R}{L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{L^2} - \frac{c^2\Phi^2}{\pi^2}\frac{1}{L\left(MK^2 + \frac{P}{g}k^2\right)}}\right]$$

et si on pose

$$\frac{c^2\Phi^2}{\pi^2}\frac{1}{L\left(MK^2 + \frac{P}{g}k^2\right)} = \mu^2\frac{R^2}{L^2} \qquad (6)$$

et

$$1 - \mu^2 = \lambda^2$$

on obtient :

$$m_1 = -\frac{R}{2L}(1 - \lambda); \qquad m_2 = -\frac{R}{2L}(1 + \lambda).$$

Remarque. — De l'équation (6) on tire

$$R = \frac{e}{\pi N}\sqrt{\frac{L}{MK^2 + \frac{P}{g}k^2}\frac{1}{\sqrt{1 - \lambda^2}}} \text{ en c. g. s.}$$

et, en ohms :

$$R = \frac{10\,e}{\pi N}\sqrt{\frac{L}{MK^2 + \frac{P}{g}k^2}\frac{1}{\sqrt{1 - \lambda^2}}}$$

où L est en henrys,

$MK^2 + \frac{P}{g} k^2$ en kilogrammes-mètres,

e force contre-électromotrice du moteur, en volts,

N nombre de tours normaux par seconde du moteur.

De l'application de cette formule, il résulte que les racines m_1 et m_2 sont toujours imaginaires dans les cas de la pratique :

$$m_1 = -\frac{R}{2L}(1 - \lambda i)$$

$$m_2 = -\frac{R}{2L}(1 + \lambda i).$$

Considérons donc seulement la solution (4')

$$I = I_n + e^{at}(G \cos bt + G' \sin bt)$$

dans laquelle

$$a = -\frac{R}{2L}; \qquad b = +\frac{R}{2L}\lambda.$$

Cette équation va nous permettre de connaître la valeur maxima du courant, quand, le moteur démarrant, on passe d'une touche à une autre touche du rhéostat.

Soit ω_p la vitesse angulaire constante qu'a prise le moteur, quand on se trouve encore sur la $p^{ème}$ touche du rhéostat et qu'on va passer sur la $(p+1)^{ème}$.

Au moment du passage, au temps $t = 0$, on a

$$I = I_n$$

ce qui donne

$$I = I_n + e^{at} G' \sin bt$$

et on a aussi, R_{p+1} étant la nouvelle résistance aux bornes d'alimentation,

$$E - \frac{c}{2\pi}\Phi\omega_p = R_{p+1} I_n + LG'b.$$

On en tire

$$I = I_n + \frac{E - \frac{c}{2\pi}\Phi\omega_p - R_{p+1}I_n}{\frac{R_{p+1}}{2}\lambda} e^{-\frac{R_{p+1}}{2L}t} \sin \frac{R_{p+1}}{2L}\lambda t. \qquad (7)$$

Cherchons la valeur du maximum de I

$$\frac{dI}{dt} = \frac{E - \frac{c}{2\pi}\Phi\omega_p - R_{p+1}I_n}{\frac{R_{p+1}}{2}\lambda} \left(-\frac{R_{p+1}}{2L} e^{-\frac{R_{p+1}}{2L}t} \sin \frac{R_{p+1}}{2L}\lambda t + e^{-\frac{R_{p+1}}{2L}t} \frac{R_{p+1}}{2L}\lambda \cos \frac{R_{p+1}}{2L}\lambda t \right).$$

Pour que $\frac{dI}{dt} = 0$, il faut que

$$\lambda \cos \frac{R_{p+1}}{2L}\lambda t - \sin \frac{R_{p+1}}{2L}\lambda t = 0$$

$$\text{tg}\, \frac{R_{p+1}}{2L}\lambda t = \lambda$$

d'où

$$t = \frac{2L}{R_{p+1}\lambda} \operatorname{arc\,tg} \lambda$$

d'où l'on déduit enfin la valeur de I maximum

$$I_{max} = I_n + \frac{E - \frac{e}{2\pi}\Phi\omega_p - R_{p+1} I_n}{R_{p+1}} \cdot 2 \frac{e^{-\frac{\operatorname{arc\,tg} \lambda}{\lambda}}}{\sqrt{1+\lambda^2}}. \quad (8)$$

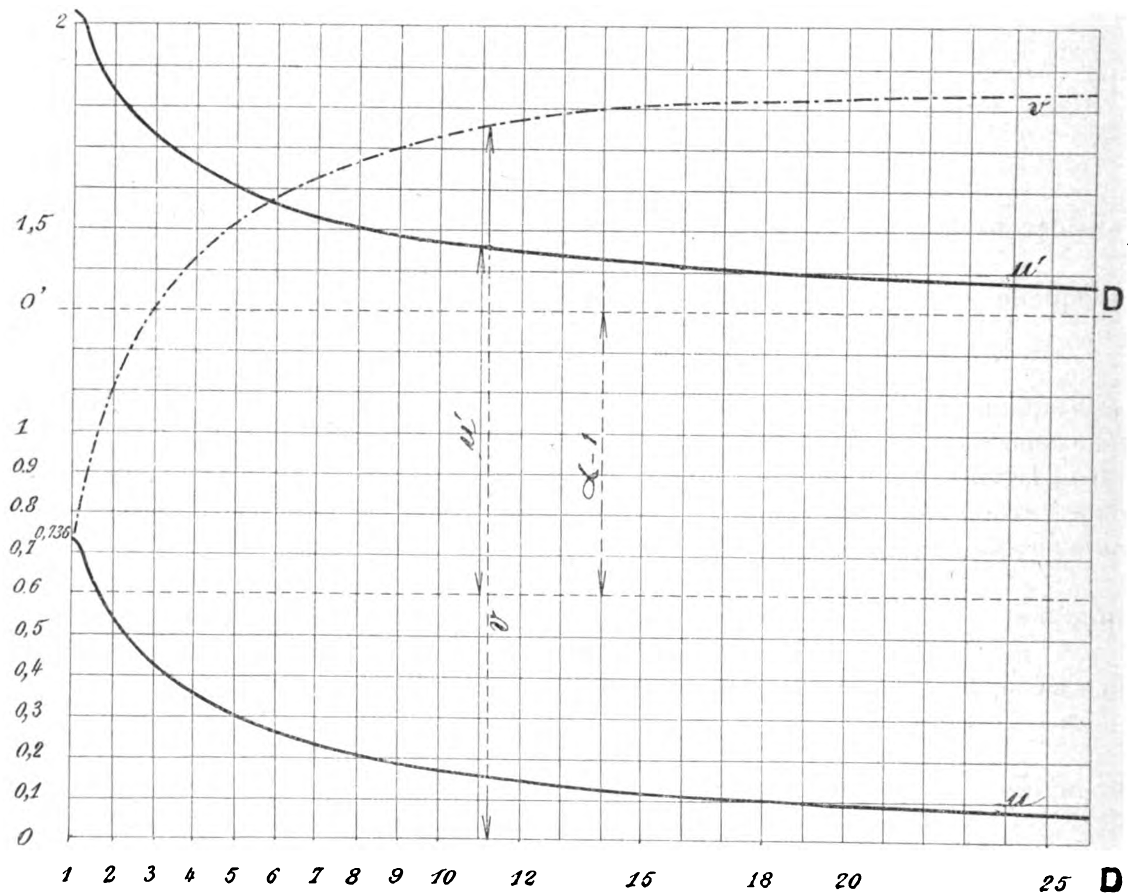


Fig. 3.

C'est l'équation à résoudre pour trouver I maximum pour chaque valeur de ω_p et R.
Nous avons vu que

$$R = \frac{e}{\pi N}\sqrt{\frac{L}{MK^2 + \frac{P}{g}k^2}} \frac{1}{\sqrt{1+\lambda^2}} = B \frac{1}{\sqrt{1+\lambda^2}}.$$

Soient u et v les 2 fonctions

$$u = 2e^{-\frac{\operatorname{arc\,tg} \lambda}{\lambda}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\lambda^2}}$$

$$v = 2e^{-\frac{\operatorname{arc\,tg} \lambda}{\lambda}}.$$

Remarquons que

$$E - \frac{c}{2\pi} \Phi \omega_p = R_p I_n .$$

Nous aurons donc en définitive :

$$I_{max} - I_n = \frac{R_p}{B} I_n v_{p+1} - I_n u_{p+1} .$$

Soit

$$I_{max} = I_n \alpha ,$$

il vient

$$\alpha - 1 = \frac{R_p}{B} v_{p+1} - u_{p+1}$$

$$v_{p+1} \frac{u_p}{v_p} = u_{p+1} + \alpha - 1 \qquad (9)$$

soit

$$u' = u + \alpha - 1 .$$

Le problème consiste donc, en dernier lieu, étant donné α, à trouver R_{p+1}.

Construisons une fois pour toutes les courbes des deux fonctions u et v, en fonction de λ.

Le tracé de ces deux courbes nous permettra de résoudre facilement l'équation (9). Elles ont l'allure de la figure 3.

La valeur de λ qui satisfait l'équation (9) étant trouvée, on en déduit immédiatement la valeur de R_{p+1}.

L'allure de la courbe (u) montre la grande influence dans la réduction du courant de la self-induction entrant en jeu au moment du démarrage ; il est donc avantageux d'accroître le plus possible sa valeur.

C'est ce que nous ont permis de constater des essais nombreux effectués en collaboration avec M. L. Isambert sur des treuils électriques monte-chaloupes de 20 tonnes, actionnés par deux moteurs de 40 chevaux. Des résultats très avantageux ont été obtenus en enroulant la résistance de démarrage sur un noyau en fer.

Aussi croyons-nous que ces quelques formules peuvent conduire à une construction plus rationnelle et plus économique des rhéostats de démarrage pour moteurs à courant continu de grande puissance.

G. Hacault.

SUR LES PARAFOUDRES

Les différents types de parafoudres généralement employés dans les installations de transmission d'énergie électrique ont été décrits il y a une année environ (1). Depuis lors, plusieurs études théoriques et pratiques remarquables sur les surtensions et les décharges oscillantes dans les longues lignes aériennes ou souterraines ont jeté quelque clarté sur un certain nombre de points obscurs et ont permis, par les applications directes qui en résultent, d'améliorer le fonctionnement de beaucoup de lignes placées dans des conditions défectueuses. Parallèlement à ces études qui, pour la plupart, ont été faites en France sous la vigoureuse impulsion de la Société Internationale des Électriciens, des études expérimen-

(1) *Éclairage Électrique*, tome XLIV, 26 août et 2 septembre 1905, pages 287 et 324.

tales pratiques ont été faites en Amérique et les conclusions auxquelles elles ont abouti, conclusions relatives tant au mode d'établissement de parafoudres qu'aux conditions d'emploi et de vérification de ces appareils, ont donné lieu à des communications à l'American Institute of Electrical Engineers. Les résultats acquis dans ces études expérimentales présentant un intérêt considérable, nous avons jugé utile de les résumer dans cette note.

M. Wirt, qui étudie depuis seize ans la question des parafoudres et a imaginé les différents types d'appareils construits par la General Electric C°, résume de la façon suivante les différents modèles de parafoudres communément employés en pratique :

Parafoudres à étincelles multiples avec résistance en série ;
Parafoudres à étincelles multiples avec résistance en shunt et en série ;
Parafoudres à étincelles sans résistance ;
Parafoudres à cornes sans résistance ;
Parafoudres à cornes avec résistance en série ;
Deux parafoudres à cornes en série à la terre avec résistance shuntant l'un d'eux ;
Jet d'eau de la ligne à la terre (limiteur de tension) ;
Fil aérien de garde relié à la terre.

Sauf les 3e et 4e types de parafoudres de cette liste, tous les autres fonctionnent avec une résistance en série. Or, M. Wirt a trouvé que la protection obtenue avec des parafoudres munis de résistances en série est très fréquemment défectueuse. L'effet des décharges atmosphériques dépend de la fréquence et du volume de courant. Quand le parafoudre est muni de résistances en série, l'élévation de tension aux bornes de ces résistances peut être considérable et dépend de l'intensité du courant qui passe ; l'effet superficiel contribue à augmenter cette élévation de tension, et c'est à elle qu'est dû sans doute le mauvais fonctionnement du parafoudre. Si l'on donne à la résistance une faible valeur, l'élévation de tension due à la résistance peut être réduite.

M. Wirt a fait des expériences sur un parafoudre à étincelles multiples sans résistance en série. Ce type d'appareil présente généralement, pour un circuit à 2 200 volts, six coupures explosives entre un conducteur et la terre, ou douze coupures entre deux conducteurs de ligne. Les expériences ont montré que ces appareils occasionnent des court-circuits et que l'arc persiste, de telle sorte que des fusibles de 100 ampères placés dans le circuit du parafoudre ont été fondus pendant la décharge. Ces parafoudres sont établis avec des métaux anti-arc. Il fallait donc trouver un moyen pour limiter le courant dynamique : ce résultat est obtenu si l'on augmente le nombre des coupures explosives, mais le parafoudre est alors moins efficace au point de vue de la protection.

On sait que le passage d'un courant trop intense dans un parafoudre amène des perturbations sur la ligne de transmission à laquelle il est relié ; c'est pourquoi il est indispensable de limiter à une faible valeur l'intensité du courant de court-circuit. M. Wirt estime que l'intensité de ce courant doit être telle qu'un fusible de trois ampères en série sur le parafoudre ne fonde pas quand cet appareil fonctionne. Dans ces conditions, il a fait une expérience sur 2 200 volts pour voir combien il faudrait placer de coupures explosives en série pour arriver au résultat fixé : il a trouvé qu'il fallait quarante-huit coupures explosives. On voit immédiatement qu'au point de vue des dimensions et du prix de revient, un tel parafoudre ne peut pas être employé dans beaucoup de cas.

M. Wirt a cherché alors dans quelles proportions il pourrait réduire le nombre de coupures explosives en shuntant par une résistance une partie des cylindres qui constituent le parafoudre. Il a trouvé que l'emploi de neuf intervalles explosifs dont six sont shuntés par une résistance en carborundum limite le courant à une valeur telle qu'un fusible de trois

ampères ne fonde pas lorsque l'appareil fonctionne. On emploie généralement deux appareils en série, qui donnent dix-huit intervalles explosifs de conducteur à conducteur, douze intervalles étant shuntés par des résistances. Les expériences faites sur ces appareils ont montré que les décharges à basse tension d'une bouteille de Leyde passent par les coupures en série et par la résistance, tandis que les décharges à haut voltage passent entièrement par les intervalles explosifs. Le parafoudre permet donc une décharge directe à la terre à travers les intervalles explosifs sans que le courant dynamique atteigne une intensité trop élevée. Cinq cents parafoudres à 2 200 volts de ce type furent mis en service il y a un an et ont donné, depuis lors, toute satisfaction. L'un de ces parafoudres, établis par la General Electric, ou, en France, par la Thomson Houston, est représenté par la figure 1.

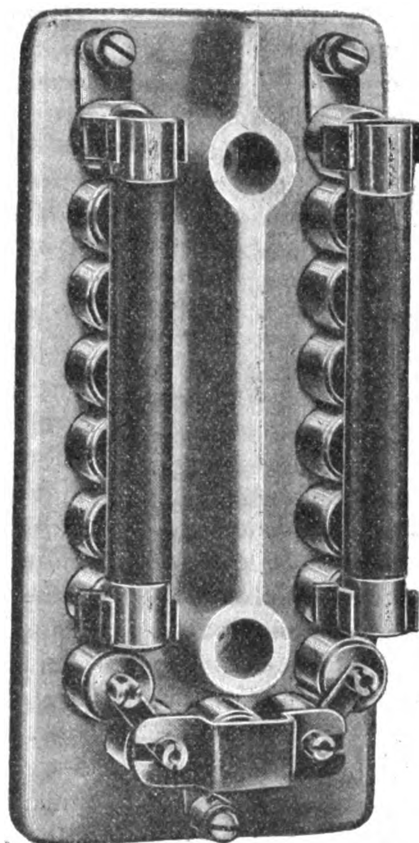


Fig. 1. — Parafoudre Thomson-Houston pour 2 200 volts.

M. Wirt a fait des expériences comparatives, dans des conditions très voisines de celles de la pratique. Il employait pour cela un alternateur de forte puissance (400 kilowatts) et reliait successivement plusieurs parafoudres de différents modèles à une ligne de 3 kilomètres connectée à l'alternateur : ces parafoudres étaient amorcés par la décharge d'une bouteille de Leyde, et l'on étudiait la valeur du courant dynamique traversant l'appareil. Un parafoudre à disques de charbon séparés par des feuilles de mica présenta des arcs très violents jaillissant entre les disques. Des parafoudres d'un modèle normal à cylindres en métal antiarc, avec six intervalles explosifs entre un conducteur et la terre, laissèrent passer un courant suffisamment intense pour fondre un fusible de cinquante ampères. Le parafoudre (figure 1) avec baguette de carborundum shuntant six des neufs intervalles explosifs laissa passer seulement un courant insuffisant pour fondre un fusible de trois ampères. Le parafoudre de modèle normal, avec intervalles explosifs et résistances série, laissa passer un courant dynamique encore moins intense, mais la résistance en série limite souvent le passage du courant de décharge, comme nous l'avons vu précédemment. A ce propos, on peut rappeler que, dans plusieurs cas, on a observé sur des parafoudres de ce modèle employés sur des lignes qu'un arc sautait des extrémités de la résistance aux parois du coffret en fer et que la décharge suivait ce chemin au lieu de passer par la résistance. Ce fait montre nettement qu'il existe une différence de potentiel énorme entre les extrémités de la résistance en série.

Les résultats de ces expériences ont montré l'avantage que présente le type de parafoudres à étincelles multiples avec résistance shunt, et ont déterminé les constructeurs à étendre l'emploi de cet appareil. Les parafoudres à résistance en série ont été rejetés, car, s'ils présentent en général un fonctionnement convenable pour les bas voltages et les faibles fréquences, ils forment des court-circuits pour les fréquences élevées, telles que celles que l'on rencontre en pratique dans les décharges. M. Wirt cite, à ce sujet, l'exemple de parafoudres triphasés avec résistance série placés à dix centimètres de montants en fer. Sous

l'effet d'un coup de foudre, un arc jaillit sur chaque phase entre les extrémités du parafoudre et le fer, la décharge préférant passer par ce chemin plutôt que par la résistance en série.

M. Osgood a fait, pendant les années 1904 et 1905, de très intéressantes expériences pratiques sur la ligne de transmission à 33 000 volts de New Milford, Connecticut. Il avait pour but d'étudier le fonctionnement des parafoudres à intervalles multiples avec résistance série et sans résistance série.

L'usine génératrice de la Compagnie exploitante est placée sur la rivière Housatonic qui coule parallèlement à la ligne reliant New-York et Connecticut. La ligne de transmission suit la rivière pendant 6 kilomètres et demi environ, puis traverse pendant 90 kilomètres une contrée accidentée formée de collines et de vallons. Cette ligne est admirablement placée pour recevoir tous les orages qui, généralement, suivent les vallées.

L'installation hydroélectrique comprend six groupes de 1 000 kilowatts à courants triphasés produisant chacun 503 ampères sur 1 150 volts à 60 périodes par seconde. La tension des courants triphasés est élevée à 33 500 volts par des groupes de transformateurs monophasés connectés en triangle. Les transformateurs qui abaissent de tension dans les sous-stations sont connectés partie en triangle, partie en étoile avec point neutre relié à la terre. La ligne de transmission est en aluminium : les fils sont soutenus par des consoles en bois et des poteaux en bois. Deux lignes de poteaux supportent chacune un circuit. Les fils de transmission sont placés au sommet d'un triangle équilatéral de $1^{m},50$ de côté.

Pendant l'année 1904, les parafoudres en service étaient du type à étincelles multiples avec résistances série. Il y avait six unités en série par phase sans aucune connexion multiplex. Chaque unité comprenait 4 étincelles et deux baguettes de 250 ohms de résistance, ce qui faisait un total de 64 intervalles explosifs et 32 résistances entre chaque conducteur et la terre. Aux sous-stations, l'équipement était le même, à part des connexions multiplex reliant les phases et consistant en des baguettes de carbone de 250 ohms de résistance, au nombre de trois à quatre ou six à huit.

Pendant l'été 1904, la plupart des décharges intenses se produisirent à proximité de la sous-station de Waterbury et, dans plusieurs cas, les parafoudres furent détruits par les décharges. Les résistances en charbon étaient invariablement mises en miettes ; les bases en porcelaine des parafoudres étaient fréquemment endommagées. Généralement les phases 2 et 3 étaient plus éprouvées que la phase 1. Dans quatre cas différents, lorsqu'il se produisit de fortes décharges sur la section de Waterbury, l'extrémité de la ligne à l'usine génératrice présenta des élévations de tension telles que les isolateurs à haute tension des barres omnibus furent percés. Dans deux cas, les parafoudres de l'usine génératrice déchargèrent la ligne suffisamment vite pour que cinq ou six baguettes de charbon fussent rompues, mais, dans les deux autres cas, la décharge fut très lente.

Ces ruptures d'isolateurs provoquèrent la mise en place de bobines de réactance entre les parafoudres et les barres omnibus à haute tension. Chaque bobine placée sur une phase comprenait 20 tours de fil de 12 centimètres 1/2 de diamètre. Aucune rupture ne se produisit plus, à partir de ce jour, sur les barres à haute tension.

Des ruptures survenues aux isolateurs de départ des lignes nécessitèrent le remplacement de ceux-ci : ces ruptures se produisirent au moment de la formation d'une terre sur la ligne.

Pendant l'un des deux plus forts orages de l'été 1904, les disjoncteurs automatiques fonctionnèrent sept fois : pendant l'autre, ils fonctionnèrent huit fois. Les disjoncteurs étaient du type à action instantanée et fonctionnaient très rapidement.

Les résultats d'exploitation pendant l'été 1904 se résument par 19 orages ayant occasionné 56 interruptions de service.

Pendant l'hiver 1904-1905, on remplaça les disjoncteurs à action instantanée par des disjoncteurs à action différée ; les relais à action différée étaient réglés pour 6,5 secondes à l'usine génératrice, et 4 secondes au poste de parafoudres de Waterbury. Les résistances série des appareils furent toutes supprimées, et les parafoudres furent remplacés par des appareils à étincelles multiples sans résistance série. Chaque élément de ceux-ci comprenait 24 intervalles explosifs : il y avait 14 éléments par phase, avec des connexions multiplex sans résistance pour relier les trois phases, et un groupe de 14 unités entre cette connexion multiple et la terre : le nombre total d'intervalles explosifs entre conducteur et terre, ou entre conducteur et conducteur, était de 672. Les bobines de réactance, semblables à celles précédemment décrites, étaient placées dans toutes les sous-stations, comme à l'usine génératrice.

Dans l'été 1905, un coup de foudre frappa directement la ligne. Sur l'un des poteaux, un fil fut rompu et l'isolateur réduit en petites miettes ; sur un autre poteau, un fil d'une autre phase fut également rompu et l'isolateur brisé ; sur un troisième poteau, le fil de la troisième phase fut rompu : plusieurs autres poteaux furent détériorés. A ce moment, les deux lignes fonctionnaient en parallèle, et la ligne intacte put assurer seule le service. Aucun appareil n'avait été endommagé en aucun point. Un second orage, l'un des plus violents qu'on ait jamais vu dans la région se produisit à proximité de la ligne et influença fortement celle-ci. Les cylindres des parafoudres furent tous soudés les uns aux autres par l'effet de la décharge : plusieurs socles en porcelaine furent brisés : aucune machine ne fut endommagée.

En novembre, un court-circuit fut produit sur la ligne par la tige métallique d'une ombrelle : deux transformateurs brûlèrent à la sous-station de Waterbury, et deux autres furent percés dans deux autres sous-stations.

Les résultats de l'exploitation de l'été 1905 se résument par quatre orages ayant occasionné sept interruptions. En 1904, les chiffres correspondants avaient été 19 et 56. Si l'on exprime le nombre d'arrêts en pour cent des orages, on constate une grande diminution, et l'on peut en conclure que la protection était beaucoup plus efficace avec les appareils employés en 1905.

Les parafoudres actuellement employés par la General Electric C° (ou la Thomson Houston en France) pour les tensions élevées sont formés de séries d'éléments juxtaposés. Chacun de ces éléments comprend un certain nombre de coupures explosives ménagées entre des cylindres en métal anti-arc qui sont disposés, suivant un V, sur une base isolante. On assemble un certain nombre d'éléments, comme le montre la figure 2 : les trois phases sont reliées entre elles par des connexions multiplex, et l'ensemble est relié à la terre par l'intermédiaire d'un nouveau groupe d'éléments semblables aux précédents. Des résistances shunt sont branchées en dérivation sur un certain nombre d'éléments de chaque groupe : elles sont formées de baguettes de graphite spécial fixées sur une base en porcelaine. Les résistances ainsi formées sont placées à proximité des groupes d'éléments. Le nombre d'éléments constituant chaque groupe est variable suivant la tension d'exploitation et suivant les conditions particulières de fonctionnement de la ligne : on peut aller ainsi jusqu'à 60 000 volts. Pour faciliter le réglage des parafoudres en fonction de la tension, on emploie à l'extrémité de chaque groupe des éléments spéciaux comprenant un ou plusieurs intervalles d'air réglables. Le montage de la figure 2 s'applique au cas où le point neutre du circuit n'est pas relié à la

terre. Quand il s'agit d'un circuit dont le point neutre est relié à la terre, on peut supprimer une grande partie des éléments du quatrième groupe aboutissant à la terre. On supprime généralement tous les éléments shuntés par la résistance, et cette résistance elle-même.

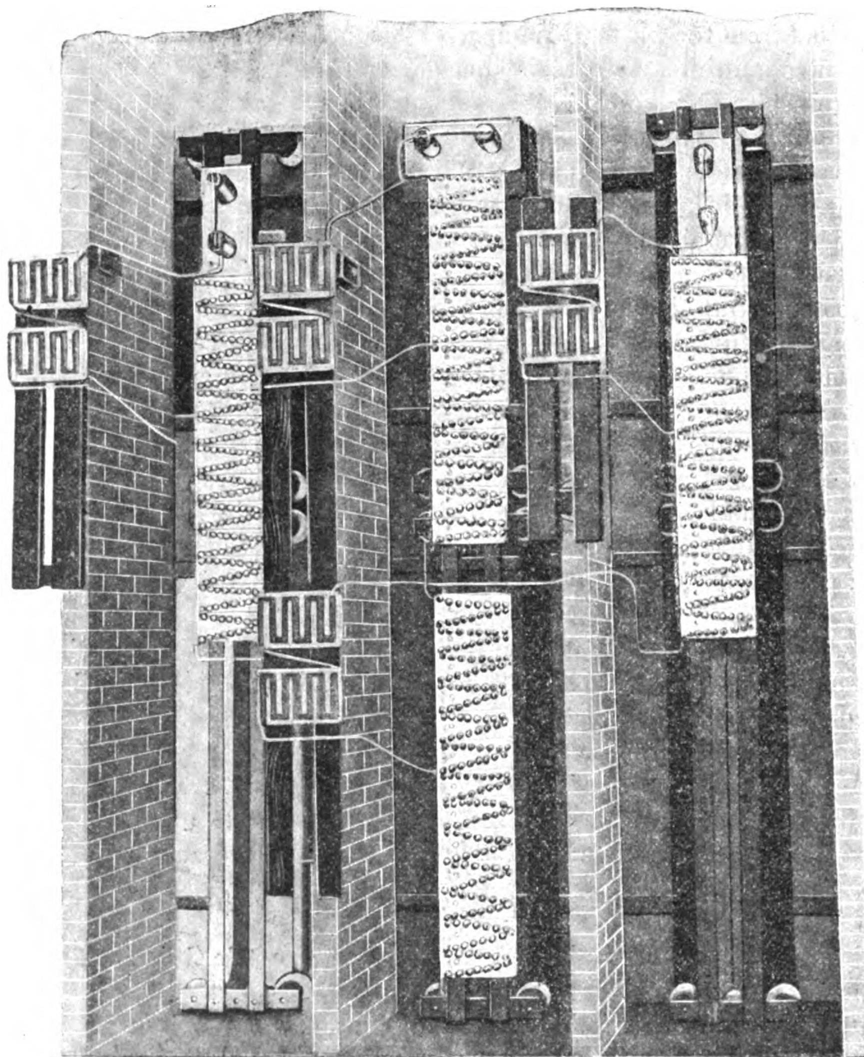


Fig. 2. — Parafoudres à haute tension avec éléments en V, résistances shunt, et connexions multiplex (Thomson-Houston).

M. Wirt a étudié les effets produits par la mise à la terre d'un des conducteurs d'une ligne triphasée. Il a trouvé, pour les lignes dont le point neutre n'est pas relié à la terre, que les intervalles explosifs des parafoudres sont franchis par des étincelles qui amorcent des arcs dynamiques, dont la conséquence est la fusion des cylindres. Une mesure expérimentale, faite avec un éclateur à pointes, a montré que, dans ce cas, la différence de potentiel de la ligne était doublée. Evidemment, la fréquence des courants est telle que les types ordinaires de voltmètres, branchés sur le secondaire d'un transformateur de mesure, ou les appareils électrolytiques, n'indiquent pas la tension exacte, qui atteint le double de la tension

normale. Il est évident que, dans ces conditions les parafoudres sont soumis à une différence de potentiel double de la différence de potentiel normale. Si les appareils sont réglés de façon que le voltage statique ne puisse pas les faire fonctionner lorsqu'une terre se produit, la protection qu'on doit en attendre pour l'isolement des lignes n'est pas efficace. Ce point doit être pris en considération quand on étudie la question des systèmes en étoile avec ou sans jonction du point neutre à la terre, et des systèmes en triangle. Avec un système en étoile avec point neutre à la terre, il ne se produit pas d'élévation de tension quand un fil de la ligne se trouve relié à la terre : il se produit un court-circuit franc et les disjoncteurs automatiques, ou autres appareils de protection, fonctionnent. L'inconvénient du système en étoile avec point neutre à la terre est que toute dérivation à la terre provoque le fonctionnement des disjoncteurs, à moins qu'une résistance ne soit intercalée dans les jonctions du point neutre à la terre : au contraire, avec un système en étoile avec point neutre isolé, la ligne peut continuer à fonctionner, dans beaucoup de cas, avec un fil à la terre. En Californie, où les orages sont peu fréquents, on emploie généralement le système en étoile avec point neutre à la terre. Les installations faites dans les autres provinces d'Amérique sont établies avec l'un ou l'autre système : il semble que les ingénieurs compétents aient maintenant une tendance à préférer le système en triangle.

Un autre point important pour le fonctionnement des parafoudres, point qu'a également étudié M. Wirt, est l'effet d'un court-circuit sur le système. Les expériences furent faites sur une ligne à 13 000 volts de 8 kilomètres de longueur. Deux court-circuits, établis à différents moments, ont entraîné à tout coup des dégâts : les parafoudres n'étaient pas, il est vrai, réglés de la façon la plus propice et il est possible que l'on puisse faire ce réglage de façon que les appareils ne soient pas détériorés.

Pour réduire le courant dynamique à une valeur convenable, il faut, comme on l'a vu, employer un très grand nombre d'intervalles explosifs en série. Dans les installations de New-Milford, dont il vient d'être question, où les parafoudres ne sont pas munis de résistances shunt, il a fallu 672 intervalles explosifs en série d'un conducteur à l'autre, ou d'un conducteur à la terre. Dans des essais, on trouva que la décharge d'une bouteille de Leyde franchit une beaucoup plus grande distance quand il y a un grand nombre d'intervalles en série que quand il y a un seul intervalle et que les cylindres ont une capacité électrostatique très élevée. Les cylindres prennent successivement des charges électrostatiques avec une tension suffisante pour que les intervalles explosifs soient franchis les uns après les autres. M. Wirt a trouvé, au cours de ses expériences, que, lorsqu'on opère avec une bouteille de Leyde, il y a peu de différence si la résistance shunt est connectée ou non. Les essais de laboratoire ont montré que les décharges d'intensité modérée à basse tension passent à travers les intervalles d'air en série et la résistance, tandis que les décharges à haute tension de grande intensité passent par tous les intervalles explosifs. Le réglage exact des intervalles série et shunt est déterminé par des essais, et un grand nombre de données sont maintenant acquises sur ce point.

En ce qui concerne le métal à employer pour l'établissement des cylindres de parafoudres, celui-ci dépend de l'intensité du courant dynamique qui peut passer dans le parafoudre après une décharge statique. Des expériences ont été faites par M. Wirt avec différents métaux et alliages : le parafoudre étudié avait 12 intervalles et était placé sur un circuit à 2 300 volts : l'amorçage était déterminé par la décharge d'une bouteille de Leyde. Des usibles de différentes grosseurs étaient placés en série avec l'appareil, et l'on déterminait

quel était le plus petit fusible que le courant ne fît pas fondre : on pouvait juger ainsi des aptitudes que présentait le métal pour étouffer l'arc.

Les cylindres d'aluminium, de zinc et d'alliages de zinc fondent facilement; les cylindres en autres composés présentent un bien meilleur fonctionnement. Avec le meilleur alliage, on peut réduire de 10 °/₀ le nombre d'étincelles en comparaison du nombre nécessaire avec des cylindres en bronze pour la même valeur du courant dynamique. Un nouvel alliage a été trouvé de 5 °/₀ meilleur que l'alliage anti-arc précédent.

En ce qui concerne l'emploi de bobines de réactance, il présente des avantages et des inconvénients. Ces bobines sont très précieuses pour empêcher le passage de décharges de grande fréquence, mais n'ont pas d'effet pour les décharges à basse fréquence : or les trains d'ondes d'origine statique doivent comprendre des oscillations de haute et de basse fréquence. On emploie souvent, pour protéger les machines et appareils, des éclateurs placés en parallèle avec eux. Un parafoudre doit éviter les perturbations dues aux oscillations à haute et basse fréquence et, à ce point de vue, les appareils à intervalles d'air avec résistance shunt doivent donner de bons résultats.

Il semble avantageux d'employer, à la partie supérieure des lignes de transmission, un fil de fer ou d'acier relié à la terre tous les quatre ou cinq poteaux. La destruction fréquente des poteaux lors de coups de foudre et l'arrêt de service qui en résulte rendent nécessaire l'emploi d'un dispositif de protection. La Commonwealth Power C° emploie, sur ses lignes à 40 000 et 60 000 volts, un fil de garde en fer supporté sur chaque poteau par un petit isolateur spécial. La Butte Transmission C° a fait des essais intéressants pour déterminer l'utilité des fils aériens de protection. Le fil établi au-dessus d'une ligne de transmission était relié à la terre par l'intermédiaire d'interrupteurs. On constata que, quand les interrupteurs étaient ouverts, les décharges aux parafoudres de l'usine étaient beaucoup plus intenses que quand les interrupteurs étaient fermés. Les essais semblent donc montrer que le fil de garde joue un rôle important.

Une autre question importante est celle des élévations de tension non seulement entre un conducteur et la terre, mais entre conducteurs d'une ligne. M. Wirt a placé sur une ligne à 2 200 volts plusieurs centaines d'éclateurs réglés pour 9 000 volts: tandis qu'il s'attendait à voir très rarement ces intervalles explosifs franchis, il constata que tous les éclateurs avaient présenté des décharges pendant les orages. Il est évident, d'après ces résultats expérimentaux, que les parafoudres doivent être établis pour limiter la tension entre conducteurs, aussi bien qu'entre la ligne et la terre, puisque les surtensions qui se produisent entre conducteurs présentent autant de danger pour l'isolement que celles qui existent entre ligne et terre.

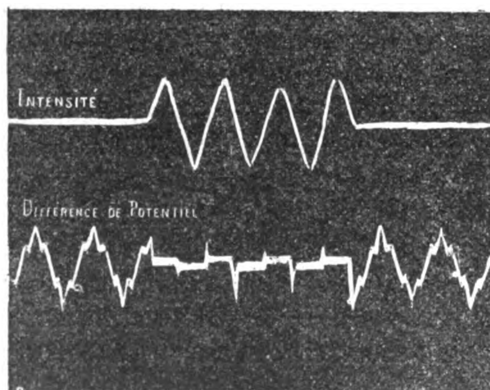


Fig. 3. — Courbes de courant et de différence de potentiel d'un élément de parafoudre en V avec 15 intervalles explosifs : courants instantanés 115, 115 et 135 ampères.

M. Wirt a enregistré, au moyen de l'oscillographe, un certain nombre de courbes de courant et de différence de potentiel pendant le fonctionnement des parafoudres. On pouvait craindre que le fonctionnement de ces appareils ne pût occasionner lui-même des surtensions, puisqu'il est bien connu maintenant que les court-circuits ou les manœuvres d'interrupteurs donnent lieu fréquemment à ces phénomènes. Il a trouvé que le passage du courant

dynamique par les intervalles du parafoudre ne peut pas donner lieu à des effets de surtension, car le courant est coupé au moment où sa courbe passe par zéro. L'oscillogramme que représente la figure 3 montre nettement ce fonctionnement : il est relatif à un parafoudre à 15 intervalles d'air et un courant de 135 ampères : d'autres oscillogrammes, relevés sur des parafoudres à 9 intervalles dont 6 shuntés, et à des courants de 18 et 1,64 ampères, présentent les mêmes particularités.

Il est extrêmement important de pouvoir contrôler, pendant l'exploitation, le fonctionnement des parafoudres et, d'autre part, de pouvoir faire sur ces appareils des essais de vérification et de réglage. Le contrôle pendant l'exploitation peut être réalisé d'une façon bien simple par l'emploi de bouts de papier mince que l'on intercale dans les intervalles explosifs : chaque fois qu'une étincelle passe entre deux des cylindres qui constituent les éléments de parafoudres, le papier est percé en un ou plusieurs points et les trous sont plus ou moins gros suivant l'importance de la décharge. Ce mode de contrôle, extrêmement simple et exact, est employé sur une très grande échelle en Amérique.

Pour faire, sur les parafoudres, des essais de vérification et de réglage, on emploie généralement un petit éclateur à pointes que l'on relie en parallèle avec le parafoudre, et l'on fait agir sur les deux appareils en parallèle une différence de potentiel croissante. On trouve ainsi une certaine distance explosive équivalant à celle que représente le parafoudre total. D'après cette distance explosive équivalente, on peut comparer entre eux différents types de parafoudres, ou bien des parafoudres du même modèle différemment réglés.

Pour l'essai complet des parafoudres, cette méthode est insuffisante. Il faut, pour pouvoir apprécier le fonctionnement de ces appareils, les étudier expérimentalement à deux points de vue différents : au point de vue du courant dynamique et au point de vue des oscillations électriques. Pour l'essai dynamique, il faut soumettre le parafoudre à une tension de même fréquence que celle de la ligne à protéger, et augmenter cette tension jusqu'à ce que l'appareil laisse passer le courant, après quoi la tension est abaissée aussitôt à sa valeur normale d'exploitation et l'on voit si l'arc s'éteint spontanément. Après cet essai, il faut faire un essai sur décharge oscillante. Souvent cet essai est fait, comme cela a été indiqué plus haut, avec un éclateur en parallèle et une machine à influence. Cette méthode conduit à des erreurs considérables, car, si la décharge est oscillante, la tension qui détermine la décharge ne l'est pas. Il en est de même quand on emploie une bouteille de Leyde. On voit facilement que les résultats obtenus sont défectueux car, si l'on répète l'expérience avec des courants oscillants produits par un circuit oscillant muni d'un éclateur, on obtient des résultats différents de ceux obtenus avec une machine statique.

Une étude très complète sur les méthodes d'essai des parafoudres a été présentée par M. Creighton à l'American Institute. Cet ingénieur rappelle d'abord que cette question présente de grandes difficultés à cause de l'incertitude que l'on a sur la nature des effets produits sur les lignes. Ces effets peuvent être dus, suivant l'auteur, à l'une des causes suivantes :

Accumulations satiques progressives ; induction statique brusque due à des décharges atmosphériques ; induction statique brusque due à la charge d'une ligne voisine ; induction électromagnétique brusque ; coup de foudre direct ; oscillations dues à la mise à la terre d'un des conducteurs ; surtensions dues à la mise à la terre de deux lignes par les parafoudres ; surtensions dues à la rupture d'un arc de court-circuit ; surtensions dues à des étincelles entre la ligne et un conducteur isolé ; surtensions dues aux décharges à travers un corps présentant les propriétés d'un cohéreur, et aux ondes de télégraphie sans fil ; sur-

tensions dues à la mise en court-circuit d'une ou plusieurs bobines d'un transformateur ou d'un générateur; surtensions dues à la fermeture d'un interrupteur sur une ligne ouverte; surtensions dues à la fermeture d'un interrupteur sur un transformateur à un point quelconque du cycle magnétique; surtensions dues à l'ouverture d'un interrupteur sur une ligne chargée; surtensions dues aux troisième, neuvième et quinzième harmoniques dans les circuits triphasés.

Les méthodes de mesure à appliquer en laboratoire sont les suivantes, d'après M. Creighton:

1° Essai avec une différence de potentiel statique continue;

2° Essai avec une différence de potentiel alternative produite par un alternateur;
  a) à la fréquence de l'alternateur;
  b) avec une connexion métallique à la terre; harmoniques jusqu'au 21e environ;
  c) avec une jonction à la terre par l'intermédiaire d'un arc : haute fréquence (300 000 périodes);

3° Essai disruptif; décharge disruptive à très grande fréquence sur courant continu ou alternatif;

4° Essai sur bobine d'induction (fréquence 100 000);

5° Essai sur une surtension à basse fréquence produite au moyen d'une bobine de réactance;

6° Essai sur l'extinction de l'arc.

1° Le premier essai, relatif à l'accumulation de charges statiques par suite du vent, de la poussière, etc. peut être fait facilement au moyen d'une machine statique. Il suffit de relier l'appareil à étudier à une machine statique, munie de condensateurs en dérivation.

2° Le deuxième essai est fait au moyen d'un transformateur au secondaire duquel on relie l'appareil à étudier. Cet essai peut être fait aussi de manière à étudier l'influence des 3e, 9e et 15e harmoniques. La tension est mesurée au moyen d'un voltmètre et d'un éclateur à pointes. Si le voltmètre (placé sur le primaire) indique une tension supérieure à celle qu'indique l'éclateur, il y a une dispersion de courant au secondaire du transformateur. Si, au contraire, l'éclateur indique une tension plus élevée que le voltmètre, il y a des oscillations à haute tension.

La source d'oscillations la plus fréquente en pratique est due à la mise à la terre d'un des fils. Un conducteur relié à la terre se trouve au potentiel zéro et, la différence de potentiel aux bornes du transformateur restant la même, la tension est doublée sur l'autre fil. La mise à la terre déséquilibre la capacité statique interne des bobines relativement au noyau et à la terre, et un courant de capacité va à la terre. La valeur de ce courant de capacité dépend de la puissance et de la construction du transformateur, de la tension, des harmoniques supérieurs dans l'onde du générateur, de la capacité extérieure à celle du transformateur statique et de la continuité du circuit de terre. Il se produit un courant de déplacement du primaire au noyau, et un autre du secondaire au primaire et, par suite, un courant de déplacement à travers l'isolement du générateur vers la terre. L'ensemble se comporte comme deux condensateurs en cascade: la f. é. m. se répartit entre les deux condensateurs d'une façon inversement proportionnelle à la capacité de chacun d'eux. La capacité du générateur est heureusement beaucoup plus grande que celle du transformateur, et la proportion du voltage secondaire au transformateur est faible. Ce phénomène est loin d'être négligeable dans les essais d'atelier où un générateur de faible puissance alimente souvent un gros transformateur. En faisant un essai de mise à la terre des parafoudres, M. Creighton a produit un percement de l'isolant d'un générateur de 500 kilowatts.

La mise à la terre permanente d'une phase du générateur ne donne pas une solution

satisfaisante contre les effets redoutés, car une surtension de grande fréquence peut se produire sur l'autre phase et se décharger à travers la bobine du générateur. Il vaut mieux placer des parafoudres bien réglés sur chaque phase du générateur.

Si l'on considère les harmoniques de l'onde du générateur, on trouve que si la jonction à la terre est continue (sans arc), les harmoniques supérieurs dans l'onde du courant de terre sont en apparence renforcés pour la fréquence qui correspond à la condition de résonance. En général, l'augmentation de tension constatée avec l'éclateur à pointes dans le cas d'une jonction continue à la terre est peu importante. Les alternateurs généralement employés présentent peu d'harmoniques supérieurs dans leur courbe de tension, et ces harmoniques ont une amplitude relativement faible : par suite, quoique la capacité et l'induction correspondent exactement à la résonance, les résistances et les pertes existantes préviennent toute grande augmentation de potentiel due au renforcement d'un harmonique par le condensateur. En outre, le point de résonance étant très étroitement limité, les probabilités pour que la capacité exacte soit obtenue accidentellement pour un harmonique déterminé sont extrêmement faibles.

Si la jonction à la terre contient un arc, la présence de celui-ci produit un renforcement des harmoniques. Le voltage maximum observé avec l'éclateur entre pointes correspond à la longueur d'arc maxima dans la jonction à la terre. La fréquence, qui est de l'ordre de 300 000 périodes, croît avec la longueur de l'arc. Avec une connexion à étincelles multiples entre un conducteur et la terre, la fréquence est extrêmement élevée. La fréquence propre calculée d'après les valeurs de l'inductance et de la capacité des cylindres entre lesquels jaillissent des étincelles est de l'ordre d'un billion par seconde. Ces oscillations propres des parafoudres ne semblent pas dangereuses pour l'isolement des appareils électriques, car, par suite de la valeur très élevée de la fréquence, les effets sont locaux.

3° La troisième méthode d'essai des parafoudres est l'essai disruptif. Pour le faire, on prend une machine statique dont chaque borne est reliée à l'une des armatures d'un ou plusieurs condensateurs statiques. Les autres armatures de ces condensateurs sont reliés à une résistance de valeur élevée, comme résistance de charge. En dérivation aux bornes de cette résistance est placé l'éclateur de mesure. La figure 4 montre ce montage. Il se produit un courant de déplacement à travers l'intervalle G compris entre les boules de la machine et son voisinage : ce courant représente une faible quantité d'électricité q et une faible énergie $1/2\ qV$ dissipée dans l'intervalle G comme dans un condensateur. Un autre courant de déplacement traverse le diélectrique du condensateur C_1, la résistance de charge et le diélectrique du condensateur C_2. L'énergie dans ce circuit est relativement beaucoup plus grande : elle est représentée comme précédemment par l'équation $1/2\ QV$ ou $1/2\ CV^2$, en appelant C la capacité des deux condensateurs C_1 et C_2 en cascade. Tant que la différence de potentiel en G croît, il passe un courant à travers la résistance de charge. Il se produit donc une chute de tension RI apparaissant à l'éclateur Q. Cette chute de tension RI peut devenir suffisante pour que l'étincelle jaillisse en Q : pour éviter cet inconvénient, il faut faire en sorte que la charge soit lente.

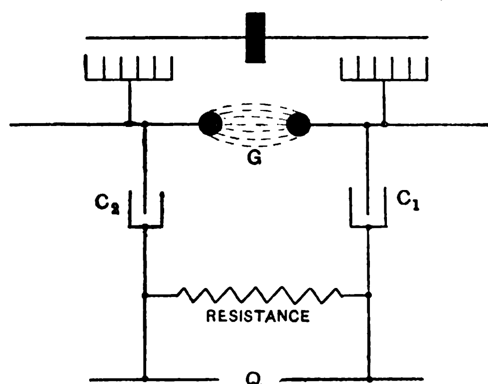


Fig. 4.

Quand les condensateurs sont complètement chargés, la différence de potentiel en Q est ...

nulle. Quand la différence de potentiel V en G atteint une valeur suffisante il se produit une décharge disruptive en G. Les phénomènes produits à ce moment diffèrent suivant qu'une étincelle jaillit ou ne jaillit pas en Q. L'étincelle oscillante en G permet la décharge de la petite quantité *q* d'électricité contenue dans la faible capacité *a b*. Le condensateur G est ainsi court-circuité. La totalité de la différence de potentiel V apparaît aux bornes de la résistance de charge et de l'éclateur Q. Si celui-ci ne laisse pas passer d'étincelle, la résistance laisse passer une décharge par un courant $I' = V/R$. La différence de potentiel et la quantité d'électricité dans le condensateur décroissent suivant une courbe logarithmique en fonction du temps. Les condensateurs n'ont pas le temps de se décharger entièrement avant que l'étincelle en G s'interrompe et ouvre le circuit. La recharge se produit et le cycle se répète.

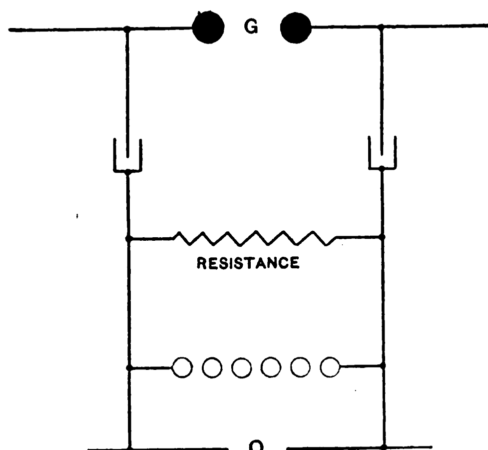


Fig. 5.

Si au contraire l'étincelle jaillit en Q, il se produit une décharge oscillante. Le courant dans l'éclateur Q dépend de la fréquence, de la différence de potentiel et de la capacité. La fréquence des oscillations est donnée par la formule ordinaire en fonction de la capacité des condensateurs C_1 et C_2 et de l'inductance du circuit. M. Creighton indique les chiffres suivants employés par lui : V = 150 kilovolts; Q = 0,4 mégohm ; courant initial dans la résistance 0,4 ampère; courant initial de la décharge oscillante 1 000 ampères environ ; fréquence 4 millions par seconde environ. Avec ces oscillations de grande fréquence, on mesure la « distance explosive équivalente » du parafoudre étudié. Cette distance explosive équivalente dépend beaucoup de la quantité d'énergie en jeu, et, en laboratoire, on dispose de capacités et de quantités d'énergie très faibles vis-à-vis des grandeurs en jeu dans une ligne de transmission. Néanmoins, l'essai de laboratoire est important, car il permet de comparer grossièrement entre elles les différentes conditions relatives de fonctionnement.

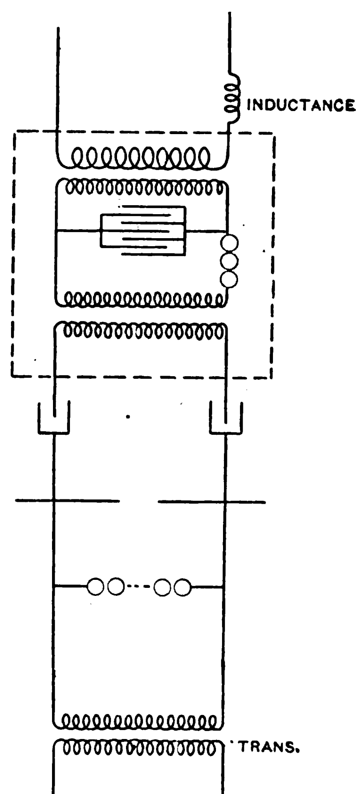


Fig. 6.

Pour ces expériences, il faut éviter la dispersion de l'électricité en G par l'effet de la lumière, de l'ionisation ou de toute autre cause. La figure 5 indique le schéma des connexions pour l'étude d'un parafoudre à étincelles multiples. Les résultats des essais faits avec différents parafoudres montrent nettement que la présence d'une résistance en série avec les intervalles explosifs des parafoudres diminue considérablement (jusqu'à 50 %) la « distance explosive équivalente » du parafoudre et diminue par conséquent l'efficacité de l'appareil, comme on l'a vu au début.

4° Le quatrième essai est fait au moyen d'une bobine d'induction ou d'un transformateur Thompson. Le schéma des connexions est donné par la figure 6 : les enroulements compris dans le rectangle en trait interrompu représente la bobine d'induction. Cet essai peut être

fait pour reproduire les conditions d'une ligne de transmission avec une phase mise à la terre par un arc.

5° Le schéma de la figure 7 montre comment on peut faire le sixième essai, relatif aux surtensions à basse fréquence qui peuvent se produire sur les lignes de transmission. Ces surtensions à basse tension, auxquelles on prête souvent peu d'attention, peuvent jouer un rôle très important, comme l'a constaté M. Creighton sur une ligne de 80 kilomètres à 33000 volts, où une surtension à basse fréquence, produite par l'ouverture brusque d'un interrupteur, a provoqué la formation d'un arc de 22^{cm},5.

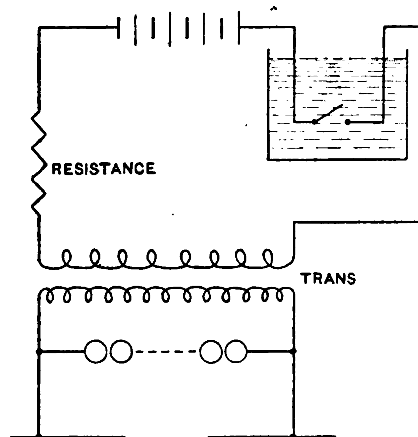


Fig. 7.

6° Les qualités que présente un parafoudre, au point de vue de l'extinction de l'arc, proviennent surtout de l'emploi d'un métal anti-arc pour la fabrication des cylindres entre lesquels jaillissent les étincelles. M. Steinmetz attribue la propriété qu'ont certains alliages d'étouffer l'arc à un effet de soupape par suite duquel le courant dans l'arc éprouve des difficultés à s'inverser. Les meilleurs corps anti-arc sont le zinc, la magnétite et le mercure. Le zinc n'est pas, à beaucoup près, le meilleur métal à employer, à cause de sa basse température de fusion. La propriété de soupape présentée par la vapeur métallique est alors inutilisée à cause de la formation de gouttelettes métalliques qui relient ensemble les cylindres. Il existe une quantité d'énergie bien définie qui peut être dépensée dans chaque intervalle explosif pendant une demi-période avant que le métal ne fonde et ne court-circuite les cylindres : cette quantité d'énergie peut être mesurée au moyen d'un wattmètre balistique.

Pour étudier, par un essai, les qualités anti-arc d'un parafoudre, on examine la décharge qui succède à une étincelle statique. Pour cela, on peut se servir avantageusement d'un oscillographe. D'ailleurs, des courbes fort intéressantes de courant et de force électromotrice dans un arc alternatif ont été publiées par M. Blondel en 1898 et montrent que le courant s'éteint avant que la f. é. m. passe par zéro.

E. Ballois.

REVUE INDUSTRIELLE ET SCIENTIFIQUE

THÉORIES ET GÉNÉRALITÉS

***Sur la charge positive portée par une particule α de radium C.* — Soddy.** — *British Association.*

L'auteur indique que les particules α émises par le radium C ne sont pas ordinairement chargées d'électricité, mais se chargent lors des collisions avec les atomes. Ce fait a été énoncé pour la première fois par Bragg qui a montré que la particule α, poussée avec une vitesse de 32 000 kilomètres par seconde (quoiqu'elle ne traverse pas plus de 7 centimètres d'air) traverse les atomes des corps solides ou gazeux. En rencontrant un électron négatif, elle se charge positivement.

Pour prouver expérimentalement que la particule α n'est pas primitivement chargée et se charge lors des collisions, il faut éviter toute collision antérieure. Il faut, pour cela, un vide très poussé et une couche de matière radioactive, d'où partent les particules, d'une épaisseur non supérieure à une molécule. Dans un vide de

1 millimètre de mercure, il y a 24 atomes par centimètre de parcours : il y a donc des chances pour que, dans un vide de 1/24 millimètre, la particule ne rencontre aucun atome. Mais ces particules étaient encore déviées par un champ magnétique très intense : elles étaient donc chargées. La déviation était visible sur un écran phosphorescent à sulfure de zinc couvert d'une feuille d'aluminium.

Finalement, l'auteur a déposé du radium sur un tube de verre dont le trou était extrêmement fin, $0^{mm},0196$, et présentait un volume de 1 centimètre cube pour une longueur de 70 mètres. L'émanation était enfermée entre deux filets de mercure, le tube était coupé à quelque distance du dépôt et, après expulsion du mercure, un faisceau à peu près parallèle de rayons α sortait de l'extrémité du tube : la longueur de parcours des rayons dans ce tube était de 15 millimètres seulement. Dans ces conditions, et en chauffant le tube pour expulser toute pellicule de gaz condensée sur lui, l'auteur a pu prouver que les particules α sont chargées par les collisions : il ne connaît pas exactement les causes perturbatrices qui ont agi dans ses premières expériences.

R. R.

***Sur l'absorption des rayons α et β.* — L. Meitner.** — *Physikalische Zeitschrift*, 1er septembre 1906.

L'auteur a mesuré l'absorption subie par les rayons α et β d'une tôle induite par du thorium B ou de l'actinium B lors de leur passage à travers différentes feuilles métalliques.

Le dispositif expérimental était le suivant. Sur la tête d'un électroscope à feuilles d'aluminium avec isolement à l'ambre était vissée une plaque métallique de $18^{cm},5$ de diamètre : une petite tablette métallique de 5 centimètres de diamètre pouvait être fixée, au moyen d'une pointe, au support des feuilles. Dans la tablette était vissée par côté une pointe métallique qui passait par un petit trou de la plaque et servait à charger l'électroscope. Sur le tout était placé un petit godet en fer étamé. Les lectures étaient faites au moyen d'une loupe, d'un miroir et d'une échelle.

Sur la tablette était placée une feuille d'étain, chargée après chaque mesure, et sur celle-ci était disposée la tôle induite. Sur cette dernière étaient empilées les différentes feuilles métalliques maintenues par un anneau métallique de telle façon qu'on fut certain que la tôle induite était bien recouverte par toutes les feuilles. Les mesures commençaient par les couches les plus épaisses, puis les feuilles métalliques étaient enlevées l'une après l'autre, et finalement on mesurait la durée de décharge pour la surface libre. On employait toujours la même tension initiale de 218 volts et la même chute de tension de 8,8 volts. Le courant observé qui, d'après une hypothèse, est inversement proportionnel à la durée de la décharge, est un courant de saturation. On tint compte, au moyen de corrections, de la diminution dans le temps de l'activité induite d'après une fonction exponentielle prise en considération. Pour la tôle induite par le thorium, la constante de demi-décomposition fut supposée égale à 11 heures ; pour la tôle activée au moyen d'actinium, elle fut prise égale à 36 minutes.

Les mesures furent faites avec du platine, de l'or, de l'argent, du cuivre, de l'étain et de l'aluminium. L'auteur donne seulement les résultats des mesures relatives au thorium B, réservant pour plus tard la publication des résultats de mesures relatives à l'actinium.

Les courbes construites d'après les intensités de courant observées (ordonnées) en fonction des épaisseurs correspondantes des feuilles métalliques (abscisses) représentent, pour de faibles épaisseurs, c'est-à-dire pour de faibles valeurs des abscisses, l'action totale des rayons α et β, et, pour les épaisseurs plus grandes, la radiation β seule. Les rayons γ ne jouent aucun rôle pour les épaisseurs employées. Pour obtenir séparément les courbes relatives aux rayons α et aux rayons β, on détermina par extrapolation les valeurs de la radiation β pour des couches minces. Les tableaux suivants indiquent les résultats des séries de mesure séparément pour les rayons α et β. La première colonne donne le logarithme des intensités de courant ; la seconde donne l'épaisseur des couches métalliques en microns.

On voit, en traçant les courbes de diminution de la radiation α en fonction de l'épaisseur croissante, que le coefficient d'absorption est une fonction de l'épaisseur et croît avec l'épaisseur de la couche traversée, rapidement pour les métaux de densité élevée et plus lentement pour les métaux de faible densité. Toutes les courbes

présentent une perturbation initiale particulière, qui ne semble pas suffisamment explicable par l'hypothèse d'une faible radiation secondaire. Peut-être est-elle due, au moins en partie, au fait que les feuilles étaient placées directement sur la tôle activée. L'angle du cône des rayons était par suite relativement grand et la modification de celui-ci produite par la superposition des premières feuilles métalliques pourrait peut-être intervenir. En fait, Bragg a trouvé, dans ses expériences, qu'il reste une action à peine perceptible quand on intercepte tous les rayons α qui ne quittent pas la tôle dans une direction perpendiculaire.

La loi indiquée par Bragg, d'après laquelle l'absorption est approximativement proportionnelle à la racine carrée du poids atomique w semble assez bien vérifiée pour les rayons α. Si l'on détermine, pour les différents métaux, les épaisseurs de couche pour lesquelles l'intensité du courant est tombée à la dixième partie de sa valeur primitive, le produit de la racine carrée du poids atomique par les épaisseurs ainsi déterminées doit être à peu près constant, d'après la loi précédente. Pour ces produits, on trouve les valeurs suivantes :

Platine	138,3
Or	162,1
Argent	158,2
Cuivre	137,5
Étain	193,4
Aluminium	155,5

1° RADIATION α

PLATINE		OR		ARGENT		CUIVRE		ÉTAIN		ALUMINIUM	
Log J	μ	Log J	μ	Log J	μ	Log J	μ	Log J	μ	Log J	μ
2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
1,97	0,14	1,96	0,24	1,95	0,38	1,94	0,94	1,55	10	1,94	2
1,94	0,7	1,77	2,04	1,79	2,16	1,82	2,62	1,18	15	1,86	6
1,83	1,26	1,63	3,84	1,69	3,8	1,71	4,7	1,05	18,24	1,61	14
1,76	2,38	1,48	5,64	1,58	4,9	1,40	9,56	0,25	26,2	1,35	20
1,58	3,5	1,30	7,44	1,41	8,5	1,21	10,36	»	»	1,03	26
1,47	4,62	1,10	9,2	1,20	11,4	1,08	12,22	»	»	0,91	30
1,37	5,74	0,86	11,02	0,9	14,7	0,84	16,98	»	»	0,55	33,8
1,06	7,98	0,65	11,8	0,63	17,0	0,67	18,8	»	»	0,46	35
0,89	9,10	0,53	12,2	0,2	19,4	0,33	22,4	»	»	»	»
0,35	11,34	0,11	13,2	»	»	»	»	»	»	»	»
0,2	12,46	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»

2° RADIATION β

OR		ARGENT		CUIVRE		ÉTAIN		ALUMINIUM	
Log J	μ	Log J	μ	Log J	μ	Log J	μ	Log J	μ
2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
1,67	11	1,89	41	1,87	42	1,83	40	1,68	96
1,41	21,6	1,81	59,2	1,7	84	1,67	80	1,52	192
1,20	32,4	1,69	68,4	1,49	126,9	1,55	120	1,42	288
1,12	43,2	1,63	85,5	1,25	228,8	1,34	200	1,25	480
1,02	64,8	1,61	102,6	1,10	246,3	1,19	280	1,18	576
0,93	75,6	1,55	112	1,0	330,9	1,06	360	1,09	768
0,86	86,4	1,37	129	0,75	432,9	0,97	440	0,96	960
0,81	97,2	»	»	»	»	0,84	600	0,82	1 142
»	»	»	»	»	»	0,77	760	0,72	1 344

Ces chiffres présentent une concordance satisfaisante, si l'on se rappelle que la loi complète de Bragg indique que l'absorption est donnée par l'expression $a\sqrt{w} + bw$, dans laquelle le second terme n'a que peu d'influence.

Les résultats de mesure montrent en outre que l'action des rayons α disparaît quand ceux-ci ont traversé une épaisseur d'aluminium de 39 microns environ.

J. Meyer et Schweidler ont indiqué qu'une épaisseur d'aluminium de 1 micron correspond, au point de vue de l'absorption, à $0^{cm},16 - 0^{cm},17$ d'air. Il en résulterait que les rayons α du thorium B n'exercent plus d'action sensible quand ils ont traversé $6^{cm},3$ d'air : ce chiffre concorde bien avec le chiffre de 6,4 directement trouvé par Meyer et Schweidler. Si l'on poursuit le calcul analogue pour les autres métaux, on trouve qu'une épaisseur de $0^{cm},16$ d'air produit la même absorption qu'une épaisseur de 0,65 micron d'étain, 0,5 micron de cuivre, 0,44 micron d'argent, 0,29 micron d'or, 0,29 micron de platine.

Les conditions sont différentes pour la radiation β. Il ne semble pas douteux qu'il y ait là une radiation secondaire, car le rapport de l'intensité de la radiation β à l'intensité de la radiation totale, pour la surface libre de la tôle activée, a une valeur différente suivant la nature des pailles métalliques employées. Les valeurs obtenues pour le rapport J_β/J sont indiquées, en pour 100, dans le tableau suivant :

Or. .	2,7
Argent.	1,95
Cuivre.	1,3
Étain. .	0,79
Aluminium.	2

Par suite de la radiation secondaire, le coefficient d'absorption de la radiation primitive varie avec les différents métaux, et d'autre part la radiation secondaire produite doit être différente pour chaque métal, ce qui modifie encore les résultats.

Mac Clelland a trouvé que la radiation secondaire croît avec le poids atomique, non proportionnellement à celui-ci, mais moins vite. Les chiffres trouvés par l'auteur présentent, sauf celui relatif à l'aluminium, une allure déterminée, qui correspond aux observations de Mac Clung. Les courbes montrent que, pour les rayons β aussi, l'absorption croît avec le poids spécifique, mais plus lentement que celui-ci. Au contraire, le coefficient d'absorption diminue en apparence avec l'épaisseur de la couche superposée, ce qui peut provenir de ce que la radiation secondaire ne se produit complètement que pour une épaisseur déterminée des couches et est moins fortement absorbée que la radiation primaire. La loi de la constance des produits de la racine carrée du poids atomique par l'épaisseur des couches pour laquelle il se produit une même diminution du courant de décharge, n'est pas non plus satisfaite par les rayons β.

B. L.

***Spectre de l'arc du fer à des pressions élevées.* — G. Duffield. —** *Royal Society.*

Humphrey et Mohler ont décrit, en 1898, quelques expériences sur l'élargissement des raies du fer sous des pressions de 4 atmosphères environ. Ces physiciens ont observé aussi un déplacement peu distinct des raies vers le rouge.

L'auteur a fait des expériences avec l'un des fours construits par Petavel et Hutton pour leurs recherches à des pressions atteignant 150 atmosphères. Un cylindre d'acier de 60 centimètres de longueur environ et de $7^{cm},5$ de diamètre intérieur était fixé à une pompe de compression. Les deux extrémités étaient munies de presse-étoupes à travers lesquels passaient les baguettes auxquelles étaient fixées les électrodes de fer. L'arc était réglé au moyen de cordelettes et de poulies. Le courant était fourni par un réseau à 100 volts. Pour faciliter l'étude du spectre, l'auteur a établi un appareil de comparaison dans lequel le spectre de l'arc sous pression apparaît entre les spectres normaux, ou bien le spectre normal apparaît entre deux spectres sous pression.

Les spectres obtenus par l'auteur avec une grille de Rowland montrent que, quand la pression atteint quelques atmosphères, les raies s'élargissent. Aux pressions de 20 ou 30 atmosphères, l'élargissement est plus prononcé et il y a un déplacement sur le rouge. Pour des pressions encore plus élevées, le spectre a tout à fait la même apparence que s'il était continu. Les raies du spectre ne sont pas toutes affectées de la même manière : la plupart des raies du fer peuvent être groupées en série. Quelquefois

une faible raie du spectre normal est plus fortement modifiée, tandis qu'une raie plus forte n'est pas affectée. Les expériences ont été faites uniquement dans l'air comprimé.

R. R.

GÉNÉRATION ET TRANSFORMATION

***Sur les machines à pôles de commutation et compensées.* — E. Arnold.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 2 août 1906.

L'auteur comprend sous le nom de machines à pôles de commutation toutes celles qui n'ont pas d'enroulement compensateur réparti, et dans lesquelles, par suite, il se produit une forte distorsion du champ, tandis que la machine compensée est munie d'un enroulement compensateur et est établie avec pôles auxiliaires ou sans pôles auxiliaires.

On a discuté déjà à plusieurs reprises pour savoir auquel genre de machines il y a lieu de donner la préférence. Les deux points les plus importants, ceux qui, avec le prix de revient, doivent servir à trancher la question, n'ont pas été envisagés. Ces deux points sont relatifs à l'augmentation de la tension entre lames sous l'effet des variations de tension, et à la dispersion des pôles de commutation.

Tension entre lames. — La plus grande différence de potentiel entre deux lames voisines dépend de la force électromotrice engendrée dans une bobine de l'induit par suite de sa vitesse périphérique, de la vitesse de variation du flux de l'induit lors des variations de charge, et de la grandeur du flux de l'induit. Lors des variations de charge, il se produit dans les bobines de l'induit, par suite de la variation du flux de l'induit et du flux des pôles de commutation des forces électromotrices qui ont pour conséquence une élévation de la différence de potentiel entre lames et des crachements aux balais.

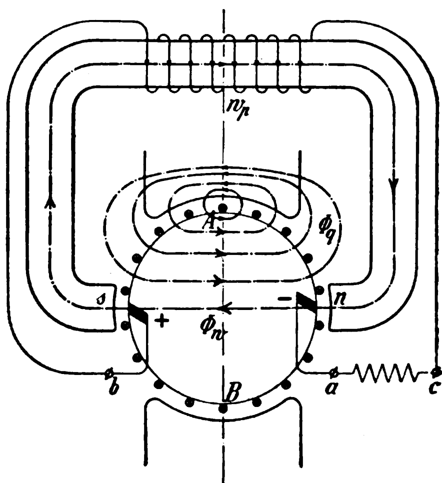


Fig. 1.

La figure 1 représente schématiquement une machine à pôles de commutation et les flux qui varient avec la charge. Le flux du pôle de commutation Φ_w traverse l'enroulement induit en sens inverse du flux transversal Φ_q. On suppose aussi que l'action de tous les flux de dispersion est contenue dans le flux Φ_q. Si la charge et, avec elle, les flux Φ_w et Φ_q varient, il se produit dans l'enroulement induit ou entre les bornes a et b une force électromotrice induite :

$$e_{a,b} = w_a \left(f_q \frac{d\Phi_q}{dt} - f_w \frac{d\Phi_w}{dt} \right) = w_a \frac{d(f_q\Phi_q - f_w\Phi_w)}{dt}.$$

Les facteurs f_q et f_w sont des facteurs d'enroulement plus petits que l'unité : ils tiennent compte de ce que, dans la plupart des enroulements induits, une partie seulement de Φ_q et, dans quelques-uns, une partie seulement de Φ_w est compensée. La force électromotrice $e_{a,b}$ se retranche (quand le courant induit augmente) ou s'ajoute (quand celui-ci diminue) aux forces électromotrices engendrées par l'induit sous l'effet de la rotation. La plus grande différence de potentiel entre deux lames, engendrée par ce mouvement, est produite par les bobines situées dans le champ le plus intense, c'est-à-dire sous le milieu du pôle, ou sous une corne polaire, s'il y a une distorsion de champ. Les bobines situées sous le milieu du pôle sont le siège des plus grandes forces électromotrices induites par le flux de l'induit et le flnx de commutation, lors des variations de charge, et par suite, la plus grande différence de potentiel entre lames est diminuée par l'action du flux de commutation Φ_w.

La force électromotrice induite entre les bornes a et c (fig. 1) sous l'effet d'une variation de charge est :

$$e_{a,c} = w_a \left(f_q \frac{d\Phi_q}{dt} - f_w \frac{d\Phi_w}{dt} \right) + w_p \frac{d\Phi_w}{dt}.$$

La self-induction de cette branche et sa constante de temps L/R est sensiblement plus grande que celle de la branche a — b. La force électro-

motrice $e_{a,b}$ est proportionnelle à $(f_q \Phi_q - f_w \Phi_w)$ et à la vitesse de variation de ce flux. Celle-ci dépend de la constante de temps L/R de tout le circuit. La constante L/R est élevée par l'emploi d'un pôle de commutation ou d'un enroulement compensateur : la vitesse des variations et, par suite, $e_{a,b}$ est donc diminuée. Le même effet est produit par tout enroulement série.

Dans les machines sans pôle de commutation et sans enroulement compensateur, il ne reste que l'action de Φ_q, et dans les machines entièrement compensées, il ne reste que l'action de Φ_w ou d'un Φ_q négatif. Or, Φ_q croît avec la charge de l'induit AC, et comme la valeur de AC peut être choisie élevée dans les machines à pôles de commutation, l'action de Φ_q est généralement supérieure à celle de Φ_w.

La force électromotrice induite par les flux Φ_q et Φ_w dépend aussi de l'amortissement. Avec des pôles massifs, l'amortissement est plus fort qu'avec des pôles feuilletés et la force électromotrice est, par suite, plus faible, les autres conditions restant les mêmes. Un fort amortissement est nuisible pour la commutation car, quand la variation du courant induit et la variation du champ de commutation sont décalées dans le temps, le champ de commutation auxiliaire est trop grand pendant un court instant, et il se produit des étincelles. Les conditions les plus favorables sont obtenues avec un champ faible Φ_q ou $(f_q \Phi_q - f_w \Phi_w)$ et un faible amortissement. On peut distinguer les cas suivants :

1° Dans les machines complètement compensées, la différence de potentiel entre lames n'est que peu augmentée par des variations de charge. Ces machines supportent donc, toutes les autres conditions restant les mêmes, la plus forte charge linéaire AC, ou les plus grandes variations de charge brusques.

2° Dans les machines à pôles auxiliaires, la différence de potentiel entre lames est moins augmentée, dans les mêmes conditions, par des variations de charge que dans les machines sans pôle de commutation : on peut donc admettre une différence de potentiel moyenne plus grande. Toutefois, la charge linéaire pouvant être prise beaucoup plus grande par suite de la meilleure commutation, il peut se produire des crachements à cause de l'augmentation de Φ_q, même pour des différences de potentiel entre lames admissibles dans des machines ordinaires.

3° Tout enroulement série ralentit la variation de Φ_q, ainsi que la présence de résistances inductives dans le circuit extérieur. Dans des conditions identiques, l'accroissement de la différence de potentiel entre lames lors des variations de charge doit donc être moins marqué que dans les machines shunt.

On peut dire d'une façon générale qu'au point de vue de la grandeur des différences de potentiel entre lames existant lors des variations de charge, la f. é. m. de self-induction de l'induit doit être aussi faible que possible dans les machines dont l'induit est fortement chargé. Pour éviter des crachements, les machines à forte charge AC doivent être munies ou bien d'un enroulement compensateur réparti, ou bien, quand il y a seulement des pôles de commutation, la réluctance magnétique pour le flux transversal doit être rendue aussi grande que possible par l'emploi d'un entrefer assez grand, de cornes polaires saturées et, quand c'est nécessaire, par l'emploi d'un entrefer dans le noyau polaire. Un élargissement du pôle de commutation ou une augmentation du flux Φ_w sont également favorables.

Dispersion. — Avec les pôles de commutation, il s'agit de produire dans la zone de court-circuit, une induction déterminée. Seul, le flux compris dans cette zone agit pour la commutation, tandis que le flux situé en dehors de cette zone est inutile pour la commutation, qu'il passe du pôle à l'induit ou du pôle à la culasse. Le flux en dehors de la zone de court-circuit doit être considéré comme flux de dispersion. Soit

$$\Phi_{wa} = B_{wl} b_{wi} l_{wi}$$

le flux de commutation pénétrant dans l'induit ; ce flux comprend le flux actif et le flux de dispersion entre le pôle et l'induit. L'induction B_{wl} dans l'entrefer du pôle de commutation est proportionnelle au flux Φ_{wa} quand la largeur idéale b_{wi} et la longueur idéale l_{wi} du pôle sont indépendantes de la charge. La largeur idéale du pôle b_{wi} dépend de la saturation des dents, mais, comme l'induction maxima dans les dents doit à peine dépasser 10 000, on peut considérer b_{wi} comme indépendant de la charge. Le flux dans les inducteurs peut être exprimé par l'égalité :

$$\Phi_{wm} = \Phi_{wa} + \Phi_{ws},$$

en appelant Φ_{ws} le flux de dispersion entre le pôle de commutation et la culasse.

La dispersion entre les masses polaires des pôles de commutation et des pôles principaux (ou entre les masses polaires de deux pôles de commutation, si l'on se représente les flux de dispersion des pôles principaux et des pôles auxiliaires comme superposés), est relativement grande dans les machines à pôles auxiliaires, parce que la résistance de l'air entre les masses polaires est faible.

A vide, la différence de potentiel magnétique ou le nombre d'ampère-tours agissant sur la dispersion entre pôles de même nom (un pôle principal et un pôle auxiliaire) est égale, si l'on néglige les ampère-tours nécessaires pour l'aimantation du noyau de l'induit, à

$$-(1/2)(AW_e + AW_z),$$

AW_e et AW_z désignant les ampère-tours pour deux entrefers du pôle principal ou deux longueurs de dents. Ces ampère-tours sont affectés du signe — parce qu'ils produisent un flux de même sens que le flux de commutation et représentent, par suite, une dispersion négative. Entre les pôles de nom contraire, il existe une différence de potentiel magnétique $+(1/2)(AW_e + AW_z)$. Les réluctances des circuits de dispersion entre le pôle de commutation W et les pôles principaux voisins N et S étant égales, le flux de dispersion passant de W à N est égal à celui qui passe de S à W, et, à vide, le flux de dispersion des pôles auxiliaires est nul.

En charge, une force magnétomotrice est produite par les ampère-tours de l'induit. Pour un demi-pas polaire, cette force magnétomotrice est égale à $(1/2)$ AC. En charge, la différence de potentiel magnétique entre un pôle auxiliaire et le pôle principal de même nom est égale, si l'on désigne par AW_{wl} et AW_{wz} les ampère-tours employés dans l'entrefer et dans les dents sous le pôle de communication, à :

$$-(1/2)(AW_l + AW_z - \tau AC - AW_{wl} - AW_{wz}). \quad (a)$$

Entre un pôle de commutation et le pôle principal de nom contraire, il existe une différence de potentiel

$$-(1/2)(AW_l + AW_z + \tau AC + AW_{wl} + AW_{wz}). \quad (b)$$

Si les pôles de commutation sont symétriques par rapport aux pôles principaux, on obtient le nombre d'ampère-tours résultants agissant sur la dispersion par addition des valeurs dans les équations a et b. Ce nombre est égal à :

$$\tau \cdot AC + AW_{wl} + AW_{wz}.$$

Donc, dans le dispositif symétrique ordinaire des pôles de commutation, on obtient le flux de dispersion en supposant qu'il existe entre un pôle de commutation et chaque pôle principal voisin la différence de potentiel magnétique $(1/2)(\tau \cdot AC + AW_{wl} + AW_{wz})$.

Si la saturation des cornes polaires des pôles principaux est forte, la réluctance entre pôle de commutation et pôle principal de même nom diminue par suite de la diminution de la saturation quand la charge augmente ; entre pôles de nom contraire, elle augmente au contraire : la dispersion varie donc certainement plus avec la charge entre les pôles de même nom qu'entre les pôles de nom contraire : le flux de dispersion entre pôles de même nom est affaibli quand la charge augmente, et il est renforcé entre pôles de nom contraire : les deux effets ont pour résultat un affaiblissement du flux de commutation.

Le flux du pôle de commutation Φ_{wa} doit être rendu aussi exactement que possible proportionnel à AC : AW_{wz} et AW_{wz} sont aussi proportionnels à Φ_{wa}. Par suite, la différence de potentiel magnétique agissant sur la dispersion

$$(1/2)(\tau \cdot AC + AW_{wl} + AW_{wz})$$

est à peu près proportionnelle à Φ_{wa}, et les flux de dispersion produits sont un certain pour cent de Φ_{wa}. Il en est de même pour la dispersion entre pôle de commutation et culasse. Pour le flux dans le noyau d'un pôle de commutation, on obtient la relation

$$\Phi_{wm} = \sigma_w \Phi_{wa},$$

le coefficient de dispersion σ_w étant à peu près le même à toutes les charges.

Le calcul de σ_w et des flux de dispersion peut d'ailleurs être fait de la même façon que pour les pôles principaux. Il n'y a pas à tenir compte de la répartition du flux des pôles principaux, parce que les flux de dispersion passent exclusivement par l'air et que, par suite, il est permis de superposer les flux.

La dispersion des pôles de commutation doit être rendue aussi petite que possible. Pour y arriver, il faut placer l'enroulement aussi près que possible de l'induit et donner à la largeur axiale du pôle une valeur inférieure à la longueur de

fer de l'induit : on économise ainsi d'ailleurs du cuivre.

Pour diminuer la dispersion et créer de la place pour l'enroulement qui va jusqu'à l'induit, il est généralement nécessaire de prendre pour l'arc polaire des pôles principaux une valeur plus faible que dans les machines ordinaires. Alors que là, on a :

$$\alpha = b_i/\tau = 0,66 \quad \text{à} \quad 0,72,$$

il faut prendre dans les machines à pôles auxiliaires :

$$\alpha = b_i/\tau = 0,62 \quad \text{à} \quad 0,68.$$

Dans les machines compensées, la dispersion entre les pôles principaux et les pôles de commutation est faible, parce que les ampère-tours de l'induit agissant sur la dispersion sont compensés. Entre un pôle principal et un pôle auxiliaire, il existe une différence de potentiel approximativement égale à

$$(1/2)(AW_{wl} + AW_{wz}).$$

L'intensité du flux de commutation B_{wl} doit varier proportionnellement à la charge de l'induit AC : cette condition est plus facilement atteinte dans la machine compensée que dans la machine à pôles auxiliaires.

Nombre de pôles auxiliaires. — Le nombre des pôles de commutation est généralement choisi égal au nombre des pôles principaux. Cependant, dans les enroulements multipolaires en tambour, on peut employer moins de pôles auxiliaires que de pôles principaux car les côtés d'une bobine sont situés dans des zones neutres successives et, dans chaque zone il y a des côtés de bobines court-circuitées par un balai positif, et des côtés de bobines court-circuitées par un balai négatif. Si un pôle de commutation produit dans un seul côté de bobine le flux suffisant pour induire la f. é. m. de commutation nécessaire, on peut supprimer le second pôle de commutation.

Avec un induit à enroulement ondulé, les bobines court-circuitées par les balais et connectées en série sont situées sous différents pôles. On peut, par suite, supprimer plusieurs pôles auxiliaires successifs et, par exemple, établir avec 3 ou 6 pôles de commutation un induit à 12 pôles avec un enroulement ondulé triple ($a = 3$).

Si l'on trace une ligne de force fermée passant par un pôle auxiliaire, l'induit, le milieu du pôle principal voisin, et la culasse, cette ligne de force embrasse $(\tau/2)$ AC ampère-tours de l'induit. Il faut donc placer sur un pôle auxiliaire à peu près $(1/2)(AC + 2AW_N)$ ampère-tours, au lieu de $\tau AC + AW_N$ ampère-tours sur deux pôles. Le nombre d'ampère-tours AW_N nécessaire pour la production du champ de commutation étant sensiblement plus faible que $(\tau/2)$ AC, il en résulte une économie de cuivre.

R. V.

***Détermination des pertes produites dans les masses polaires par la denture de l'induit.* — Wall et Smith.** — *Electrical World*, 18 août 1906.

On sait que, dans les dynamos génératrices à courant continu et les convertisseurs à induits dentés, des pertes sont produites dans les masses polaires par les courants de Foucault et l'hystérésis, à cause de la pulsation du flux principal due au déplacement de la denture en face des masses polaires. Ces pertes atteignent une certaine valeur même quand les masses polaires sont feuilletées.

Les auteurs se sont proposés d'étudier la valeur de ces pertes : ils ont supposé pour cela que toute la puissance consommée par les pertes est dissipée sous forme de chaleur. Pour déterminer ces pertes, les auteurs ont fait tourner une dynamo tantôt en faisant passer le flux par des pôles expérimentaux ; tantôt sans faire passer le flux par ces pôles (et par suite sans pertes dans le fer des masses polaires), toutes les autres conditions restant les mêmes, et la température étant maintenue constante par une source d'énergie extérieure. L'énergie ainsi nécessaire pour élever la température à la valeur atteinte par suite de l'échauffement dû aux pertes permet de mesurer directement la valeur de celle-ci. Pour réaliser cet échauffement artificiel, les auteurs ont employé une méthode électrique, en noyant complètement dans les masses polaires des bobines en fil résistant et en faisant passer dans celles-ci un courant d'intensité suffisante. Pour pouvoir faire passer le flux par les pôles expérimentaux dans une série d'expériences, et ne pas le faire passer dans l'autre série d'expériences, et pour obtenir les mêmes conditions d'échauffement dû aux bobines inductrices quand le flux passe ou quand il ne passe pas, les auteurs ont employé une machine tétrapolaire. Deux pôles opposés seulement C et D portaient des bobines

d'excitation. Les deux autres A et B n'en étaient pas munis. Quand les deux bobines étaient connectées de façon que C et D fussent des pôles nord et sud, aucun flux ne passait par les pôles A et B ; quand, au contraire, les bobines étaient connectées de façon que les pôles C et D fussent tous deux de même nom, le flux passait par les pôles A et B qui prenaient des polarités contraires. Ainsi, une simple inversion de courant de C ou D permettait de modifier les conditions de l'expérience comme il a été dit, et l'échauffement dû au courant d'excitation était le même dans les deux cas. Pour l'échauffement artificiel, quatre encoches furent faites à l'intérieur de la masse polaire étudiée : deux bobines furent placées dans ces quatre encoches et pouvaient être reliées en série ou en parallèle suivant le besoin. Pour mesurer la température aux différents points de la masse polaire, on employait des éléments thermo-électriques formés simplement de fils de cuivre fins placés contre la masse polaire.

Les expériences étaient conduites de la façon suivante :

La machine était entraînée à une certaine vitesse avec une excitation déterminée, et le flux passait par la masse polaire expérimentale qu'il échauffait par suite de ses pulsations. Quand un état stationnaire était atteint, on mesurait les températures. On inversait ensuite la connexion en C ou D de façon que le flux ne passât plus par le pôle expérimental, et l'on faisait passer un courant électrique dans les bobines de chauffage. Quand l'état stationnaire était atteint, on mesurait la différence de potentiel et l'intensité de courant des bobines de chauffage. En modifiant l'induction et la vitesse, on pouvait tracer point par point les courbes donnant la variation des pertes dans le fer dans les masses polaires.

R. R.

Sur le champ magnétique dans le moteur d'induction monophasé. — **S. Mac Allister.** — *Electrical World*, 18 août 1906.

On sait que, quand les circuits d'un moteur d'induction polyphasé tournant à une vitesse voisine du synchronisme sont disposés de telle façon que l'on puisse convertir la machine en moteur monophasé, le champ tournant qui était primitivement dû aux actions combinées de certaines composantes des courants polyphasés, continue à exister et l'action de la machine, produisant de la puissance mécanique, ne change pas. On sait aussi que la composante « de vitesse » en quadrature du champ magnétique est produite par le courant dans le secondaire, et que la force magnétomotrice représentée par ce courant secondaire doit être fournie par une composante du courant primaire. Par suite du fait que le courant secondaire qui produit le « flux de vitesse » en quadrature occupe dans l'espace une position telle qu'il ne peut pas réagir directement sur le flux produit par le courant primaire, on ne voit pas immédiatement de quelle manière les « watts en quadrature » pour le « flux de vitesse » sont fournis par la force magnétomotrice primaire d'excitation.

On étudie généralement les phénomènes internes du moteur d'induction monophasé par la méthode de Ferraris d'après laquelle le flux alternatif simple peut, dans tous ses effets, être remplacé par deux flux tournants qui se déplacent en sens inverse et dont la valeur maxima est égale à la moitié de la valeur maxima du flux alternatif. Au moyen de cette méthode il est possible d'étudier la distribution du courant dans le secondaire et la création de certaines composantes du courant secondaire sur le primaire. L'auteur pense que la signification des résultats obtenue est rendue obscure pour un grand nombre de lecteurs par suite de la difficulté qu'il y a à distinguer ce qu'il y a d'imaginaire de ce qu'il y a de réel dans cette méthode.

Un auteur compétent indique que « la cause de l'aimantation transversale dans le moteur d'induction monophasé au voisinage du synchronisme est que les courants induits dans le rotor sont déphasés de 90° en arrière du flux inducteur et sont décalés de 90° dans l'espace par la rotation synchrone avant d'atteindre leur maximum » et que « au-dessous du synchronisme, les courants induits dans le rotor sont décalés de moins de 90°, l'aimantation transversale qu'ils produisent étant réduite d'une façon correspondante, et devenant nulle à l'arrêt ». Il est très douteux que ces explications donnent une idée physique à ceux qui ne sont pas tout à fait familiarisés avec les faits.

Quoique la méthode dont il va être question ne puisse pas servir pour étudier tous les faits que l'on ne peut expliquer par les autres méthodes fréquemment employées, on peut obtenir de

beaucoup meilleurs résultats en portant son attention sur le fait que tous les phénomènes liés à la production du champ magnétique dans le moteur d'induction monophasé peuvent être suivis avec la plus grande facilité par l'étude directe des relations électromagnétiques bien connues sans qu'il soit nécessaire d'employer des représentations imaginaires physiques ou mathématiques.

La figure 1 montre un moteur d'induction

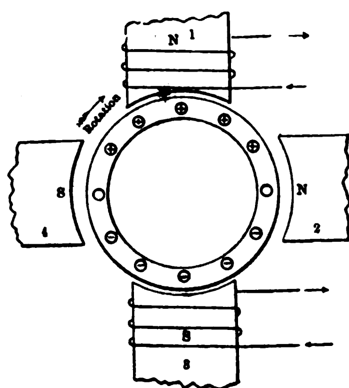


Fig. 1. — Production du courant de champ de vitesse.

monophasé à deux pôles représenté comme ayant quatre pôles mécaniques dont deux (1 et 3) sont excités par un courant alternatif monophasé. Pour simplifier les explications, les pôles mécaniques 2 et 4 sont indiqués comme étant soumis exclusivement au flux du « champ de vitesse ». Dans toutes les conditions de fonctionnement, le flux dans les pôles 1 et 3 est déterminé directement par la force électromotrice primaire, modifiée par les volts absorbés dans l'impédance locale de la bobine primaire par le courant qui la traverse. Le flux dans ces pôles suit donc les lois qui régissent les transformateurs statiques : aucune action qui se produit dans le secondaire ne peut échapper au primaire.

En ce qui concerne le secondaire, les conducteurs rotoriques sont soumis à l'action du champ de transformateur (pôles 1 et 3) et du champ de vitesse (pôles 2 et 4). Chaque conducteur rotorique est donc soumis à quatre forces électromotrices distinctes, les forces électromotrices produites par les alternances du champ de transformateur et du champ de vitesse, et les forces électromotrices produites par le mouvement de rotation du rotor dans ces champs. Chacune de ces forces électromotrices doit être traitée séparément et les effets combinés doivent être étudiés.

Quand le rotor se déplace dans le champ de transformateur dans la direction indiquée, une force électromotrice est engendrée dans chacun des conducteurs placés sur les pôles et est proportionnelle au produit du flux par la vitesse du rotor. Si la vitesse est constante, cette force électromotrice varie évidemment comme l'induction : elle sera maxima quand l'aimantation est maxima, et nulle quand l'aimantation est nulle. Toutes autres conditions restant les mêmes, la valeur maxima de la force électromotrice secondaire varie directement comme la vitesse du rotor.

Si les circuits du rotor sont fermés, il y passera des courants dont les intensités dépendent directement des forces électromotrices engendrées dans les conducteurs et inversement de l'impédance des conducteurs du rotor. Le courant qui passe à travers les circuits du rotor engendre un flux magnétique qui, par suite de ses variations de valeur, produit dans les conducteurs du rotor une force contre-électromotrice opposée à celle qui détermine le passage du courant et de valeur telle que la différence entre elle et cette force électromotrice est exactement suffisante pour faire passer à travers l'impédance « locale » des conducteurs un courant dont la force magnétomotrice a la valeur convenable pour faire passer dans la réluctance du circuit magnétique le flux nécessaire. Ce flux devant présenter un régime de variations égal (approximativement) à la force électromotrice engendrée dans les conducteurs du rotor par leur mouvement dans le champ primaire, et cette force électromotrice étant en phase dans le temps avec le champ primaire, il en résulte que le flux doit avoir une valeur proportionnelle au régime de variations du flux primaire : il est donc approximativement déphasé de 90° par rapport à celui-ci.

Une étude de la direction des courants dans le rotor pour les conditions supposées montre que, quand un pôle nord ou 1 (fig. 1) a atteint sa valeur maxima et décroît vers zéro, le champ de vitesse est formé avec un pôle nord ou 2, et que ce pôle continue à augmenter d'intensité jusqu'à ce que l'aimantation en 1 change de sens. Ainsi on peut prouver que le pôle nord de l'aimantation résultante se déplace dans la direction du

mouvement de rotation du rotor. La rapidité d'inversion de signe des pôles du « champ de transformateur » et des pôles du « champ de vitesse » dépendant seulement de la fréquence, on peut prouver que le flux résultant tourne à la vitesse du synchronisme. Le « champ de vitesse » est approximativement égal au produit du « champ de transformateur et de la vitesse » le synchronisme étant pris pour unité. Le champ résultant est elliptique à une vitesse quelconque : un axe de l'ellipse est déterminé par le « champ de transformateur » et l'autre dépend de la vitesse. Au synchronisme, l'ellipse devient un cercle. Au-dessus du synchronisme, le plus grand axe est dans la direction du « champ de vitesse » ; à la vitesse nulle, l'ellipse est une ligne droite, et l'on voit qu'à l'arrêt il n'y a pas de flux en quadrature dans l'espace et par suite pas de flux tournant.

Revenant aux phénomènes électromagnétiques décrits, on peut noter que la f. é. m. qui produit le courant du « champ de vitesse » est engendrée par le mouvement du rotor dans le flux de transformateur. La position mécanique du courant du « champ de vitesse » par rapport à la bobine primaire l'empêche de réagir directement sur le flux du transformateur. Il reste à étudier l'effet des f. é. m. engendrées dans le secondaire par les variations du « champ de transformateur » à travers le conducteur du rotor et par le mouvement des conducteurs du rotor à travers le « champ de vitesse ». Aucune de ces f. é. m. ne peut produire un courant susceptible d'affecter le « champ de transformateur ».

Supposons que le rotor, entraîné par une machine extérieure, tourne à la vitesse du synchronisme, et considérons le rotor dans une position décalée de 90° dans le sens de rotation par rapport à la position de la figure 1. Comme on l'a dit plus haut, la f. é. m. statique du « champ de vitesse » dans le rotor est un peu plus faible que la f. é. m. dynamique du « champ de transformateur » et est déphasée d'une quantité égale à la f. é. m. nécessaire pour faire passer le courant du « champ de vitesse » à travers l'impédance « locale » des conducteurs du rotor. La f. é. m. dynamique du « champ de vitesse » dans le rotor diffère de la f. é. m. statique du « champ de transformateur » d'une quantité exactement égale, de sorte qu'un courant exactement égal au courant du « champ de vitesse » est produit dans le rotor dans une position telle dans l'espace que sa force magnétomotrice tende directement à modifier le « champ de transformateur ». Le « champ de transformateur » devant avoir une valeur correspondant à celle de la f. é. m. primaire, il doit passer dans la bobine primaire un courant égal comme force magnétomotrice et opposé en direction à cette composante du courant secondaire. Comme on peut le vérifier en étudiant le flux et les courants, cette composante du courant secondaire a une phase telle qu'elle tende à diminuer le « champ de transformateur » ; le courant opposé dans le primaire est donc une composante additive du courant d'excitation primaire. Ainsi le courant du « champ de vitesse » est exactement représenté dans la force magnétomotrice d'excitation produite par le courant primaire.

Il est intéressant de noter que la composante additive du courant primaire d'excitation dépend de la réluctance du circuit magnétique suivi par le flux du « champ de vitesse » ; quand l'entrefer traversé par le flux de vitesse est beaucoup plus grand que celui qui traverse le flux de transformateur, comme cela est représenté sur la figure 1, la composante additive est beaucoup plus grande que le courant d'excitation primaire. Ainsi, les watts totaux d'excitation en quadrature sont égaux à la somme des watts qui seraient nécessaires pour la production du même champ magnétique au moyen de courants déphasés dans des bobines enroulées symétriquement sur leurs pôles 1, 2, 3 et 4, et nécessairement égaux au double de la valeur prise initialement par les enroulements placés sur les pôles 1 et 3.

On peut étudier les conditions qui existeraient si les deux composantes du courant secondaire à la vitesse du synchronisme pouvaient continuer à circuler sans modification avec le primaire ouvert. Comme on l'a dit, le courant du « champ de vitesse » et la composante du courant secondaire qui tend à s'opposer au champ de transformateur sont déphasés de 90° et décalés de 90° : si donc ils ne rencontrent pas d'obstacle à leur action, ils produisent un champ magnétique tournant. C'est un fait curieux que ce champ magnétique tende à tourner autour de l'entrefer dans une direction opposée au sens de rotation du rotor. Puisque les deux composantes d'excitation du courant secondaire se combinent dans le rotor pour produire un courant résultant dis-

tribué dans tous les conducteurs, on peut dire qu'une portion de courant secondaire d'excitation tourne synchroniquement dans une direction négative. Si l'on considère les valeurs instantanées du courant dans un conducteur simple du rotor, on voit qu'à la vitesse du synchronisme ce courant a une fréquence double. Aux autres vitesses, comme on le verra plus loin, le « courant secondaire d'excitation » présente une valeur approximativement proportionnelle à la vitesse et continue à tourner synchroniquement dans le sens négatif : la fréquence de ce courant dans un conducteur individuel du rotor est donnée par la formule

$$f_1 = f_p(1 + S),$$

f_1 étant la fréquence du courant secondaire, f_p celle du courant primaire et S la vitesse exprimée avec la vitesse du synchronisme pour unité.

On peut chercher les effets produits lorsque le rotor tourne à une vitesse inférieure au synchronisme et voisine de celui-ci. Puisqu'il n'y a pas de force magnétomotrice opposée au champ de vitesse, la composante du courant du rotor qui correspond au champ de vitesse agit comme si elle existait seule dans les conducteurs secondaires, et sa valeur n'est pas affectée par la présence d'une autre composante du courant secondaire. Ainsi, la f. é. m. nécessaire pour faire passer dans les conducteurs secondaires le courant correspondant au « champ de vitesse » dépend seulement de la valeur de la composante du courant du rotor correspondant au « champ de vitesse ». La f. é. m. engendrée dans le secondaire par le mouvement des conducteurs dans le « champ de transformateur » dépendant directetement du produit de ce champ par la vitesse, il en résulte qu'une portion déterminée de cette f. é. m. dynamique est dépensée à toutes les vitesses dans l'impédance secondaire « locale » et que le déphasage entre la f. é. m. dynamique et la f. é. m. statique du « champ de vitesse » est toujours constant. Ainsi le rapport du « champ de vitesse » à une vitesse S au « champ de transformateur » est égal au produit de S par une certaine constante qui tient compte de la différence de valeur et de phase du champ de vitesse et du champ de transformateur au synchronisme exact. Il en résulte que la composante du courant secondaire correspondant au champ de vitesse a une valeur exactement proportionnelle au produit de la vitesse S, du courant correspondant au champ de vitesse au synchronisme, et du rapport de la valeur du champ de transformateur à la vitesse S à celle du synchronisme.

La f. é. m. statique du champ de transformateur dans le rotor dépendant de l'intensité de ce champ, mais étant indépendante de la vitesse du rotor, tandis que la f. é. m. dynamique opposée du champ de vitesse varie comme le produit de la vitesse par le champ de vitesse, il en résulte que la f. é. m. résultante qui tend à produire le courant watté dans le secondaire à la vitesse S est approximativement égale au produit de $(1 - S^2)$ par la f. é. m. statique (figure 2). Cette composante du courant secondaire occupe toujours dans l'espace une position magnétiquement en ligne avec le champ de transformateur et elle réagit sur le primaire comme si elle passait à travers le secondaire d'un transformateur statique dans une résistance de charge (fictive) non inductive : elle est superposée dans l'espace, mais non dans le temps, à la composante du courant secondaire d'excitation tournant, qui s'oppose directement au champ de transformateur.

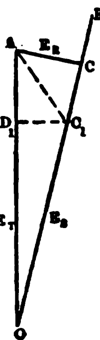


Fig. 2.

Dans la figure 2, OA représente la valeur de la f. é. m. statique E_t du champ de transformateur dans le rotor. E_t varie directement avec le champ de transformateur et décroît comme le courant primaire droit. L'angle AOB représente le déphasage entre E_t et E_s, f. é. m. dynamique du champ de vitesse dans le rotor ; l'angle AOB est constant à toutes les vitesses. Au synchronisme, E_s a une valeur OC telle que la résultante de E_t et E_s donne la force électromotrice E_r produisant la composante du courant rotorique qui réagit sur le primaire. A une vitesse S un peu plus faible, E_s a une valeur OC_1 telle que $OC_1 = S^2(OC)$, en négligeant la diminution relative dans la valeur de E_t, et la force électromotrice résultante qui produit le courant réagissant sur le primaire est représentée par AC_1. La composante C_1D_1 de cette f. é. m., déphasée de 90° sur la f. é. m. statique, varie avec S^2, carré de la vitesse (c'est-à-dire qu'elle décroît avec S), tandis que la composante AD_1, en phase avec la f. é. m. statique, varie avec $(1 - S^2)$ (c'est-à-dire croît quand la vitesse décroît). C'est à cette dernière compo-

sante que l'on peut attribuer le courant secondaire de charge, et à la première composante que l'on peut attribuer la composante du courant d'excitation tournant négativement qui s'oppose directement au champ de transformateur.

Quand le rotor est immobile, la composante de charge du courant secondaire dans les conducteurs individuels a une fréquence égale à la fréquence primaire : aux vitesses voisines du synchronisme, sa valeur varie dans chaque conducteur rotorique individuellement ; dans les uns, elle est unidirectionale ; dans les autres, situés à 90 degrés électriques des premiers dans l'espace, elle est alternative avec une fréquence double.

On voit qu'il existe dans le rotor trois composantes du courant secondaire, chacune de fréquence primaire : le courant du champ de vitesse, le courant ayant une valeur à peu près égale au produit du courant du champ de vitesse par la vitesse, mais décalé et déphasé de 90°, et le courant de charge. Chacun de ceux-ci varie de valeur avec le champ de transformateur. Le premier varie directement avec la vitesse S. La force électromotrice qui produit le deuxième varie avec S^2, et la force électromotrice qui produit le troisième varie avec $(1 - S^2)$. Au synchronisme, les deux premières composantes ont des valeurs égales et la troisième seulement passe dans le rotor. Dans toutes les conditions, la deuxième et la troisième composantes se combinent pour former le courant secondaire de la machine considérée comme un transformateur ; la deuxième composante agit comme un courant déwatté décroissant avec la vitesse ; la troisième agit comme si elle passait du secondaire dans une résistance de charge non inductive.

Les relations qui existent entre les différentes composantes des flux, des courants et des forces électromotrices dans le rotor à différentes vitesses sont représentées graphiquement par les figures 3 et 4. Dans la figure 3 la longueur AD est prise arbitrairement : AEFD est un demi-cercle. Si DE est égal à la vitesse S, BD est égal à S^2. Considérons le cas où la vitesse S a la valeur représentée par FD : le rapport du « champ de vitesse » au « champ de transformateur » est représenté directement par la ligne FD ; celle-ci représente aussi le rapport du courant réel du champ de vitesse au courant réel du champ de transformateur, et de même le rapport de la composante du courant secondaire qui s'oppose directement au champ de transformateur, au courant réel du champ de vitesse. Ainsi, si, pour la vitesse représentée par FD, AD est supposé égal au courant du champ de transformateur, DF est égal au courant réel du champ de vitesse, et CD est égal à la composante « opposante » du courant secondaire. En outre, si, à la vitesse FD, AD est égal à la f. é. m. qui serait produite dans le secondaire par le champ de transformateur avec le rotor immobile, CD est la f. é. m. dynamique due au mouvement dans le champ de vitesse, et AC est la f. é. m. qui détermine le passage du courant de charge à travers l'impédance secondaire.

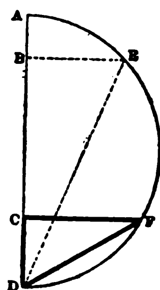


Fig. 3.

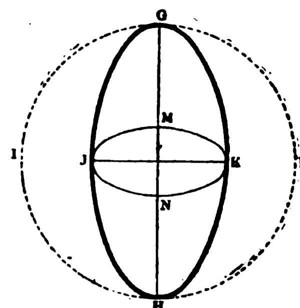


Fig. 4.

Le diagramme de la figure 3 donne seulement les valeurs numériques relatives des différentes composantes et n'indique pas leurs phases ou leurs calages. Le calage et la phase des forces électromotrices sont représentés sur la figure 2 : les valeurs équivalentes pour les flux et les courants sont données par le diagramme de la figure 4. Dans celui-ci, GH est égal à AD (figure 3) et la courbe GLHI est un cercle. JK est égal à FD et la courbe GKHJ est une ellipse ; MN est égal à CD et la courbe GKHJ est une ellipse. La valeur dans l'espace du flux à la vitesse synchrone est représentée par le cercle GLHI : à la vitesse DF sa valeur est représentée par l'ellipse GKHJ. Si la ligne GH représente la valeur et la phase du courant réel du champ de transformateur, la ligne JK représente en même temps la valeur et la phase du courant réel du champ de vitesse : ces courants ne se combinent pas directement, mais leurs forces magnétomotrices se combinent pour produire le champ magnétique elliptique tournant. La valeur et la phase de la composante « opposante » du courant secondaire sont représentées par la ligne NM : ce courant se combine avec le courant JK pour produire le « courant

une longueur d'ondes différente de celle du presecondaire d'excitation tournant négativement », représenté par la courbe KMJN qui est une ellipse.

Il est intéressant d'observer que le courant actuel du champ de vitesse dans le secondaire varie directement avec la vitesse, mais que la composante du courant secondaire qui réagit directement sur le champ de transformateur varie avec le carré de la vitesse ou, plus correctement, avec le carré du champ de transformateur. Il y a lieu de noter que, par suite de ce fait, les « watts totaux d'excitation en quadrature » du moteur d'induction monophasé varient directement avec le carré du champ de transformateur augmenté du carré du champ de vitesse. Ainsi les watts d'excitation réels de la machine, à une vitesse quelconque, sont directement proportionnels à la somme des carrés des inductions traversant les différents circuits magnétiques.

R. R.

Bobine de réactance réglable. — **Gumlich.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 2 août 1906.

L'auteur a fait établir une bobine de réactance réglable pour les circuits à courant alternatif. L'appareil comprend une bobine magnétisante de section rectangulaire de 42 centimètres de longueur, dans laquelle un noyau de 50 centimètres de longueur formé de tôles de 5 centimètres de largeur et de $0^{mm},5$ d'épaisseur peut être déplacé. Soit q la section de fer du noyau, n le nombre de tours de la bobine magnétisante, p et α la fréquence et le facteur de forme du courant alternatif, B l'induction maxima dans le noyau de fer, le flux d'induction alternatif dans le noyau de fer produit dans la bobine une force contre-électromotrice :

$$e_1 = 4pn\alpha q\mathrm{B}\ 10^{-8}\ \mathrm{V}.$$

Cette force électromotrice s'ajoute géométriquement à la chute ohmique de tension $e' = iw$. Pour une valeur donnée w de la réactance, l'intensité i du courant dépend donc de la grandeur de la force contre-électromotrice e', c'est-à-dire aussi du nombre n des tours actifs de la bobine magnétisante. Cette grandeur n peut être modifiée facilement, par un déplacement du noyau de fer : pour cela, ce dernier, placé verticalement, est équilibré par des contre-poids auxquels il est relié par deux cercles passant sur des poulies. Une tige fixée au noyau assure le guidage.

Pour obtenir une fermeture suffisante du circuit magnétique et renforcer ainsi l'action de la bobine, on a placé, parallèlement au noyau de fer, le long des grands côtés de la bobine, des paquets de tôles que relient haut et bas avec le noyau deux paquets de tôles formés de bandes juxtaposées : l'entrefer est aussi réduit que possible. La bobine a 0,35 ohm de résistance environ et contient deux couches de 120 tours d'un fil de cuivre de $2^{mm},7$: la charge maxima est de 70 à 80 ampères environ.

E. B.

OSCILLATIONS HERTZIENNES & TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

Sur l'interférence en télégraphie sans fil. — **Fessenden.** — *Electrical Review*, juillet 1906.

A l'occasion de la conférence qui se réunira prochainement pour discuter les questions internationales relatives à la télégraphie sans fil, l'auteur examine les différentes méthodes et solutions qui permettent d'éviter l'interférence des postes entre eux et la réception par un poste de signaux ou de télégrammes qui ne lui sont pas destinés. Il indique les principaux résultats des expériences faites sur l'accord des postes basé sur la résonance et montre, d'après ces résultats, et particulièrement d'après ceux obtenus par Pierce dans ses études très complètes sur ce sujet [1], que l'on ne peut obtenir la sélectivité en s'appuyant seulement sur les phénomènes de résonance.

L'amplitude des oscillations dans le circuit résonant ne peut pas, en effet, croître indéfiniment. Au moment où les pertes dans le circuit résonant ont une valeur égale à l'énergie reçue par ce circuit, il ne peut plus y avoir d'accroissement d'amplitude. Si l'on suppose que le circuit résonant ait, par exemple, un rendement de 99 %, ce qui est beaucoup, 1 % de l'énergie est dissipée sous forme de pertes. L'intensité des signaux sera 100 fois plus grande que quand le circuit n'est pas en résonance. Si donc un poste récepteur est accordé avec un poste transmetteur et qu'il y ait un autre poste transmetteur de même puissance que le précédent, mais dix fois plus rapproché, travaillant avec

[1] Voir *Éclairage Électrique*, tome XLIII, 17 juin 1905, page 429 et tome XLVI, 3 février 1906, page 193.

mier transmetteur, l'intensité des signaux provenant de l'un et l'autre transmetteur sera la même au poste récepteur, puisque la radiation varie comme l'inverse du carré de la distance. Donc, quoique non accordé, le récepteur recevra aussi bien les signaux du second transmetteur que ceux du premier. On voit que, même en admettant un rendement de 99 °/₀ pour le circuit résonant, une station interférente comprise dans un rayon égal à 10 °/₀ de la distance du poste transmetteur pourra empêcher complètement le poste récepteur, accordé avec ce dernier, de recevoir des signaux. C'est à peu près ce que l'on a trouvé dans des expériences pratiques : dans des essais faits par la marine américaine, on a constaté qu'un poste interférent placé dans un rayon égal à 20 °/₀ de la distance séparant le transmetteur du récepteur, pouvait empêcher la réception des signaux.

L'accouplement des circuits électriques joue un rôle important au point de vue de la résonance. Soit A un circuit oscillant ayant une fréquence propre X et B un autre circuit dont la fréquence propre est aussi X. Si l'on accouple indirectement ces circuits, B formant le secondaire et A le primaire, on sait que les courants dans les deux circuits ne sont pas en phase. Le courant dans chaque circuit peut alors être séparé en deux composantes, dont deux sont opposées en phase l'une à l'autre, et dont les deux autres concordent en phase. Les deux circuits A et B ont donc deux valeurs du coefficient de self-induction, suivant que l'on considère les composantes en phase ou opposées l'une à l'autre. C'est pourquoi il y a, en général, deux fréquences naturelles pour chacun des circuits.

Il existe deux cas dans lesquels les deux circuits ont une fréquence simple: c'est lorsque l'accouplement est tout à fait rigide, ou parfait, c'est-à-dire quand il n'y a pas de dispersion, car les courants passent alors par zéro aux mêmes instants, ou bien lorsque l'accouplement est tout à fait lâche ou imparfait. L'accouplement lâche présente l'inconvénient que l'énergie transmise diminue de plus en plus à mesure que le degré d'accouplement diminue et que les fréquences se rapprochent l'une de l'autre. En outre, même avec un très faible coefficient d'accouplement, la différence entre les fréquences est beaucoup trop grande pour les applications pratiques. Avec les méthodes actuelles, une différence de fréquence de 1,5 °/₀ est une différence importante : dans les expériences faites par l'auteur entre l'Ecosse et l'Amérique (Massachussets) une différence de 0,25 °/₀ dans la fréquence suffisait pour affaiblir plus de 20 fois l'intensité des signaux. Si les circuits sont accouplés assez imparfaitement pour que les deux fréquences diffèrent de 0,25 °/₀, la quantité d'énergie transmise est extrêmement faible.

Le Dr Fleming et l'auteur préconisent, dans la plupart des cas, l'emploi d'un accouplement rigide. Le Dr Fleming préfère un accouplement tel que l'on puisse utiliser le troisième harmonique. L'auteur préfère avoir une seule fréquence, ou bien employer un accouplement moyen et disposer le circuit récepteur de façon qu'il réponde aux deux fréquences produites.

Quand on eut reconnu que la sélectivité ne peut pas être obtenue au moyen de la résonance et que les circuits ne peuvent jamais être accouplés d'une façon assez imparfaite pour donner un accord suffisant, on eut recours à d'autres méthodes. L'une des plus anciennes consiste à relier l'antenne à deux branches parallèles qui, elles-mêmes, sont reliées à la terre. Chaque branche contient un condensateur et le primaire d'un transformateur. Les deux primaires sont identiques, les condensateurs ont des capacités différentes : l'un d'eux a une capacité telle que le circuit formé par l'antenne, sa branche et la prise de terre, soit accordé exactement sur la fréquence employée. L'autre a une capacité un peu différente, de 5 °/₀ par exemple. Les deux secondaires des transformateurs sont identiques et sont connectés en opposition dans un circuit contenant un condensateur et le détecteur d'ondes. Quand les ondes reçues par l'antenne proviennent bien du transmetteur avec lequel on veut communiquer, c'est-à-dire quand la fréquence de ces ondes est la même que celle du circuit formé par l'antenne et l'une des branches, il y a résonance et la plus grande partie des ondes reçues passe par cette branche : le secondaire du transformateur correspondant produit alors une f. é. m. dans le circuit du détecteur qui se trouve impressionné. Au contraire, si la fréquence des ondes reçues ne concorde pas avec celle d'une branche, le courant se répartit à peu près également entre les deux branches ; les secondaires des deux transformateurs produisent des forces électromotrices égales et opposées, et le détec-

teur n'est pas impressionné. On peut régler la capacité de la seconde branche de façon à se débarrasser des signaux perturbateurs ou parasites. Il n'y a que les signaux dont la fréquence diffère de moins de 1 °/₀ de la fréquence employée qui peuvent être gênants ; les signaux parasites dont la fréquence diffère de 0,25 °/₀ seulement de celle employée affaiblissent de moitié l'intensité des signaux reçus provenant du transmetteur accordé. Quand il y a un grand nombre de postes interférents, on se sert souvent de quatre circuits divisés, dont deux sont accordés sur la fréquence employée, le troisième sur une fréquence supérieure et le quatrième sur une fréquence inférieure.

Avec ce dispositif appelé « préservateur d'interférence » et sur les perfectionnements duquel il n'est pas possible actuellement de donner d'autres détails, l'auteur emploie un transmetteur dont les signaux sont produits par une modification de fréquence, les oscillations étant engendrées d'une façon continue. La modification de fréquence est de 0,25 ou 0,125 °/₀; l'avantage est que tout poste non accordé reçoit continuellement des oscillations et ne peut distinguer les signaux.

Le poste récepteur, au contraire, reçoit les oscillations quand la clé est abaissée, c'est-à-dire quand la fréquence a la valeur convenable, et ne les reçoit plus quand elle est levée, c'est-à-dire quand la fréquence diffère de 0,25 ou 0,125 °/₀. Actuellement, la modification de fréquence n'est pas obtenue par une clé que l'on abaisse, mais par la fermeture d'un circuit amortisseur formé d'un tour de fil placé à proximité du transformateur ou de la bobine d'inductance du circuit transmetteur. Normalement, il est maintenu fermé par un ressort, et il neutralise environ 0,5 °/₀ de l'inductance du circuit transmetteur, modifiant ainsi la fréquence d'environ 0,25 °/₀. La clé de manœuvre ferme le circuit d'un électro-aimant qui agit pour ouvrir le tour de fil.

De nombreuses expériences ont montré l'efficacité des dispositifs employés pour éviter l'interférence. L'auteur en cite plusieurs exemples. Le poste de Brant-Rock, par exemple, établi pour communiquer avec l'Ecosse (4 806 kilomètres) est entouré de 11 postes dans un rayon de 90 kilomètres et de 6 postes dans un rayon de 48 kilomètres. Parmi ces postes, il y a ceux de Boston et de Lynn, dont la puissance s'élève à 15 et 26 chevaux, et le poste ultra-puissant que Marconi a installé à Wellfleet pour communiquer avec l'Angleterre. Il est donc évident que le poste de Brant-Rock n'aurait pas pu être établi sur ce point s'il existait des possibilités d'interférence. L'expérience a montré qu'aucun de ces postes ne peut connaître les moments où Brant-Rock communique avec Machrihanish (Ecosse). Le poste de Boston ayant reçu l'ordre d'interférer exprès autant que possible, on put, à Brant-Rock éviter complètement la réception des signaux émis par ce poste et recevoir pendant ce temps les signaux de Machrihanish, qui étaient affaiblis de 50 °/₀ seulement.

L'auteur décrira prochainement des expériences montrant que des messages peuvent être reçus par une antenne pendant que celle-ci est employée à la transmission avec un autre poste sans que les messages transmis et reçus interfèrent aucunement. L'auteur indique que les dispositifs actuellement employés par lui, mais dont il ne peut pas donner encore la description, sont tout à fait différents des anciens : le transmetteur ne contient pas d'éclateur à étincelles, et le récepteur enregistre les signaux par une action électrodynamique directe. Ces appareils ne sont pas troublés par l'interférence ni par les décharges atmosphériques, et présentent différents avantages importants.

R. V.

ÉLECTROCHIMIE

***Sur la production d'ozone dans l'oxygène et l'air atmosphérique sous l'effet de la décharge silencieuse continue entre électrodes métalliques.* — E. Warburg et G. Leithaüser.**
— *Drudes Annalen*, août 1906.

On obtient de l'ozone avec de l'air atmosphérique en faisant passer des décharges silencieuses alternatives soit entre électrodes métalliques, soit entre surfaces diélectriques (tube de Siemens). Les auteurs ayant constaté que l'emploi de décharges silencieuses continues entre électrodes métalliques semble présenter des avantages pour la préparation de l'ozone, ont fait des expériences pour voir ce que l'on peut obtenir dans cette voie. Il ne s'agit pas seulement, particulièrement pour les emplois techniques de l'ozone, de la quantité produite, mais de la con-

centration obtenue. Les auteurs ont déterminé le nombre de grammes d'ozone produits par ampère-heure (A) et le nombre de grammes d'ozone produits par kilowatt-heure (B) en fonction de la concentration pour l'oxygène sec et l'air atmosphérique sec. En appelant V la différence de potentiel entre les électrodes, on a $B = A/V$.

La décharge silencieuse peut être obtenue non seulement entre pointes, mais aussi entre sphères de 1,5 à 2 millimètres de diamètre. L'électrode sphérique, particulièrement comme cathode dans l'air atmosphérique, donne une beaucoup plus grande quantité d'ozone que la pointe, probablement parce que la densité de courant est plus faible. Les électrodes sphériques ont, en outre, l'avantage de ne pas se détériorer comme les pointes pendant le fonctionnement. Les expériences des auteurs ont toutes été faites entre électrodes sphériques soudées à des fils de platine de 1 millimètre de diamètre.

L'armature intérieure d'une grosse bouteille de Leyde était reliée d'une part à l'une des bornes de la source de courant, et d'autre part à la terre par un éclateur présentant une coupure explosive de 1 centimètre entre pointes. Quand on intercalait dans cette prise de terre un tube de Geissler et un téléphone, la cathode du tube, examinée au miroir tournant, présentait une bande lumineuse entièrement uniforme et le téléphone restait silencieux. Le potentiel pouvait donc être considéré comme constant. Ce n'était plus le cas quand la décharge silencieuse se transformait, dans l'appareil, en décharge par étincelles. On reconnaissait de même la constance du courant par l'emploi d'un tube de Geissler intercalé entre la machine et l'armature intérieure de la bouteille de Leyde.

L'air passait dans une solution de permanganate de potasse avant de traverser les tubes de séchage. Dans ce qui suit, les auteurs appellent électrode de tension celle qui était reliée à la machine, et électrode de terre, l'électrode formée d'une feuille de platine, reliée à la terre. Comme électrode de tension, on employait 4 à 8 petites sphères en parallèle. La pression p dans l'appareil était supérieure, de 20 millimètres environ, à la pression atmosphérique : J est l'intensité de courant en ampères et J_1 l'intensité de courant par sphère ; v est le nombre de centimètres cubes de gaz, mesuré à la pression atmosphérique, passant dans l'appareil par seconde; c'est la concentration, égale à $m.10^3/v.t.$ 60 grammes par centimètre cube, en appelant m le nombre de milligrammes d'ozone produits en t minutes. A est la production d'ozone en grammes par ampère-heure ; B la production d'ozone en grammes par kilowatt-heure ; V le potentiel de la bouteille par rapport à la terre.

Les résultats sont donnés par les tableaux I, II, III et IV.

TABLEAU I

Oxygène : électrode de tension négative.

8 sphères sans intervalle explosif.

$J.10^3 = 0,14$, $J.10^3 = 0,0175$, $p = 796$, $\theta = 20°$.

v	c	A	V	B
12,56	1,25	415	5 930	70,0
6,32	2,46	400	5 950	67,2
3,98	3,68	377	5 980	63,0
3,92	3,93	397	5 980	66,3
3,90	3,96	397	5 980	66,3
3,0	4,87	376	6 000	62,7
2,53	5,88	383	6 020	63,6
1,95	7,20	361	6 040	59,8
1,43	9,48	349	6 100	57,2
0,97	12,9	314	6 170	50,9

$A = 419 - 7,74 . c = 419(1 - 0,0185\,c)$.

$B = 71,0 - 1,58 . c + 0,00090\,c^2$
$= 71,0(1 - 0,0221\,c + 0,000013\,c^2)$.

$V = 5\,900 + 21\,c = 5\,900(1 + 0,00356\,c)$.

4 sphères sans intervalle explosif.

$J.10^3 = 0,20$, $J_1.10^3 = 0,05$, $p = 788$, $\theta = 19°$.

v	c	A	V	B
13,4	1,62	389	6 710	58,0
12,5	1,74	391	6 710	58,3
9,87	2,20	391	6 850	57,1
5,63	3,73	378	6 850	55,2
5,23	3,89	367	6 900	53,2
5,38	3,94	382	6 950	55,0
3,73	5,28	354	7 040	50,3
2,77	6,81	339	7 040	48,2
2,74	6,88	340	7 040	48,3
1,93	9,34	323	7 090	45,6

$A = 409 - 9,60 . c = 409(1 - 0,0235\,c)$.

$B = 61,1 - 1,90 . c + 0,0034\,c^2$
$= 61,1(1 - 0,0310\,c + 0,000056\,c^2)$.

$V = 6\,690 + 50\,c = 9\,690(1 + 0,0075\,c)$.

TABLEAU II

Air atmosphérique : électrode de tension négative.
4 sphères sans intervalle explosif.
$J.10^3 = 0,16$, $J_1.10^3 = 0,065$, $p = 7,75$, $\theta = 19°$.

v	c	A	V	B
12,2	1,62	274	7 390	37,1
8,7	2,34	279	7 770	35,9
6,2	3,09	259	7 770	33,3
4,35	4,16	250	7 890	31,7
3,69	4,66	238	7 890	30,1
2,86	5,3	209	7 890	26,5
2,17	6,73	196	8 110	24,2
1,36	9,1	172	8 230	20,9

$A = 306 - 15,4\,c = 306\,(1 - 0,050\,.\,c)$.

$B = 41,2 - 2,59\,.\,c + 0,0069\,.\,c^2 = 41,2\,(1 - 0,0629\,c + 0,00017\,c^2)$.

$V = 7\,430 + 94,5\,c = 7\,430\,(1 + 0,0127\,c)$.

TABLEAU III

Oxygène : électrode de tension positive.
4 sphères avec un intervalle explosif.
$J.10^3 = 0,13$, $J_1.10^3 = 0,033$, $p = 766$, $\theta = 17°$.

v	c	A	V	B
18,0	1,18	599	8 920	67,2
12,4	1,58	544	8 920	61,0
11,0	1,79	549	8 920	61,5
7,0	2,65	515	8 920	57,7
4,37	3,92	475	8 920	53,3
3,53	4,48	437	8 920	49,0
3,52	4,54	442	8 920	49,6
2,88	5,35	427	9 030	47,3
1,53	8,49	360	9 030	39,9

$A = 598 - 30,7\,.\,c$.

$B = 67,0 - 3,44\,.\,c$.

TABLEAU IV

Air atmosphérique : électrode de tension positive.
4 sphères avec un intervalle explosif.
$J.10^3 = 0,2$, $J_1.10^3 = 0,05$, $p = 788$, $\theta = 18°$.

v	c	A	V	B
38,2	0,58	400	7 090	56,6
12,8	1,52	350	7 190	48,7
10,6	1,91	364	7 380	49,3
9,48	1,99	339	7 290	46,5
7,13	2,72	349	7 570	46,1
5,53	2,99	298	7 570	39,4
4,15	3,94	295	7 670	38,5

$A = 412 - 31,2\,.\,c$.

$B = 60 - 6\,c$

Si l'on trace les courbes correspondant aux résultats obtenus, on voit que la relation est linéaire. Les écarts irréguliers entre les valeurs observées et les valeurs calculées au moyen d'une formule linéaire s'élèvent généralement à 2 °/₀ au maximum ; il peut se produire de plus grands écarts, particulièrement avec une électrode de tension positive. Les écarts sont plus importants pour l'air que pour l'oxygène et se manifestent surtout pour les fortes concentrations.

Le potentiel V croît avec la concentration de l'ozone, plus pour l'air atmosphérique que pour l'oxygène, et l'on peut admettre que V est une fonction linéaire de c. C'est pourquoi, dans la représentation de B en fonction de c, il y a un petit terme du deuxième degré.

On voit, d'après les chiffres trouvés, que la production d'ozone dans l'oxygène et l'air atmosphérique diminue sensiblement plus vite pour une augmentation de concentration quand l'électrode de tension est positive que quand elle est négative : dans ce dernier cas, la diminution est d'autant plus faible que la densité de courant sur chaque sphère est plus faible. Pour le cas, particulièrement important en pratique, de la préparation de l'ozone au moyen d'air atmosphérique, on trouve que, pour de faibles concentrations jusqu'à 4 grammes d'ozone environ par mètre cube, la décharge avec sphère positive est plus avantageuse, tandis que, pour les fortes concentrations jusqu'à 10 grammes d'ozone, la décharge avec sphère négative vaut mieux. On peut, avec une faible intensité de courant ($0,023.10^{-3}$ ampère) pour une concentration de 8 à 9 grammes d'ozone par mètre cube, obtenir encore environ 30 grammes d'ozone par kilowatt-heure.

E. B.

***Influence de l'humidité et de la température sur la formation d'ozone dans l'oxygène et dans l'air atmosphérique.* — E. Warburg et G. Leithauser.** — *Drudes Annalen*, août 1906.

Le gaz à ozoniser était chargé de vapeur d'eau par son passage dans un tube recourbé de 92 centimètres de longueur et 12 millimètres de diamètre dans lequel était placée de l'eau : ce tube était disposé dans un bain réfrigérant à alcool refroidi par de l'acide carbonique liquide. La température de ce bain pouvait être abaissée jus-

qu'à — 40° et maintenue constante à 0°,1 près. A sa sortie du tube, l'air avait la température du bain, comme l'ont montré des mesures thermométriques : la pression de la vapeur d'eau était donc bien celle correspondant à la température du bain. Avant de pénétrer dans l'appareil à décharge, le gaz passait dans un tube disposé au centre d'une enveloppe d'eau à la température ambiante. Les températures du bain réfrigérant furent de — 30°, — 20°, — 8°, + 6°, correspondant à la pression de 0,29, 0,79, 2,35 et 7 millimètres.

L'influence de la vapeur d'eau sur la production de l'ozone est variable suivant la forme de décharge. Il faut distinguer trois cas :

1° Électrode de tension positive, intensité de courant élevée ;

2° Électrode de tension négative ;

3° Electrode de tension positive, faible intensité de courant.

Dans un gaz humide, la tendance à la formation d'étincelles est plus marquée que dans un gaz sec : dans l'oxygène humide, elle est si forte que l'on était obligé, dans le premier cas, d'employer un fil de platine épais au lieu d'une petite sphère. Dans l'air, les expériences étaient faites avec la sphère : dans les deux cas, un petit intervalle explosif était en série.

Le troisième cas fut étudié dans l'air atmosphérique avec une petite sphère sans coupure explosive en série : le fil auquel était fixée la sphère était entouré d'un tube de verre pour éviter la production de décharges.

Dans toutes les expériences, la vitesse du courant gazeux était grande et, par suite, la concentration en ozone faible. Le gaz employé traversait toujours au préalable une solution de permanganate de potasse.

Les résultats obtenus sont résumés dans les tableaux suivants dans lesquels J désigne l'intensité de courant dans l'électrode en ampères, V la différence de potentiel, y inclus celle de l'intervalle explosif, quand il y en avait un en série, p la pression dans l'appareil, p' la pression de la vapeur d'eau, θ la température, v la vitesse du courant gazeux, mesuré par le nombre de centimètres cubes de gaz à la pression atmosphérique passant par seconde dans l'appareil, c la concentration de l'ozone en grammes par mètre cube, A la production en grammes d'ozone par ampère-heure.

TABLEAU I

Oxygène : électrode de tension positive avec intervalle explosif.

$J \cdot 10^3 = 0{,}08$, $V = 10\,200$.

$p' = 0$. $p = 793$, $\theta = 18{,}5°$, $v = 17°$.

c	A
0,54	389
0,49	396

$p' = 0{,}29$. $p = 793$, $\theta = 19°$, $v = 16$.

c	A
0,49	375
0,56	378

$p' = 0{,}79$. $p = 782$, $\theta = 18°$, $v = 16$

c	A
0,48	343
»	344

$p' = 2{,}35$. $p = 782$, $\theta = 20°$, $v = 16$.

c	A
»	304
0,52	304
0,45	307
0,42	301

$p' = 7$. $p = 778$, $\theta = 20°$, $v = 13$.

c	A
0,49	263
0,46	249
0,44	259

Valeurs moyennes.

p'	A	A calc.	100 A/A_0 calc.
0	393	400	100
0,29	377	365	91,3
0,79	344	344	86
2,35	304	309	77,3
7	257	256	64

La comparaison des résultats a été faite au moyen de la formule empirique

$$A = A_0 e^{-m\sqrt{p'}}$$

ou

$$\log A = \log A_0 - m \log e \sqrt{p'}$$

qui, dans le voisinage des valeurs pour l'air sec (p' — o) présente une diminution un peu plus rapide que celle observée pour la production A quand p' croît. Dans le cas présent, la formule était la suivante :

$$\log A = 2{,}602 - 0{,}0731 \sqrt{p'}$$

On voit, d'après ces résultats, que la présence de vapeur d'eau diminue moins la production d'ozone dans l'oxygène que dans l'air.

L'influence de la température sur l'ionisation fut déterminée pour l'oxygène et l'air atmosphérique avec une électrode de tension sphérique : la densité ou la pression du gaz étant maintenues constantes. Les résultats sont indiqués par le tableau V.

On voit, d'après ces chiffres que, quand la densité est maintenue constante, il se produit une petite augmentation de production dans

l'oxygène et une petite diminution de production dans l'air atmosphérique pour une augmentation de température.

TABLEAU II

Air atmosphérique : électrode positive (sphère) avec intervalle explosif.

$p' = 0$. $p = 790$; $\theta = 20°$; $J.10^3 = 0,15 - 0,2$.		$p' = 2,35$. $p = 800$, $\theta = 17°$, $J.10^3 = 0,14$.	
c	A	c	A
1,29	466	0,83	318
$p' = 0,29$. $\theta' = 16°$, $J.10^3 = 0,18$, $v = 17$.		0,80	318
		0,74	320
1,23	432	$p' = 7$. $\theta = 19°$, $J.10^3 = 0,11$.	
1,32	440		
$p' = 0,79$. $p = 780$; $\theta = 17°$, $J.10^3 = 0,15$.		0,51	238
		0,43	220
1,09	384	0,38	231
1,09	385		
0,71	384		

Valeurs moyennes.

p'	A_m (1)	A_0 (1)	A	A calc.	100 A/A_0 calc.
0	467	498	483	499	100
0,29	436	453	445	421	86,4
0,79	383	413	398	392	78,6
2,35	319	339	329	330	66,1
7,00	230	255	243	245	49,1

$$\log A = 2,698 - 0,117\sqrt{p'}$$

(1) A_m et A_0 désignent la valeur de la production avec et sans passage dans l'eau.

TABLEAU III

Oxygène : électrode négative (2 sphères avec intervalle explosif).

$J_1 . 10^3 = 0,07$, $V = 10400$, $p = 780$, $\theta = 19°$.

p'	c	A	100 A/A_0
0	1,31	454	100
2,35	1,11	442	97,4

Oxygène : électrode négative (3 sphères sans intervalle explosif).

$J_1 . 10^3 = 0,033$, $V = 6800$.

p'	c	A	100 A/A_0
0	1,64	341	100
7	1,68	319	94,4

TABLEAU IV

Air atmosphérique : électrode négative (2 sphères avec intervalle explosif).

$J . 10^3 = 0,10$, $J_1 . 10^3 = 0,05$, $p = 790$, $\theta = 20°$, $V = 9900$.

p'	c	A	100 A/A_0
0	0,87	277	100
0,79	0,76	245	88,4
2,35	0,74	232	83,8
7	0,63	193	69,7

TABLEAU V

Électrode positive (sphère avec intervalle explosif).

p	θ	c	A	100 . $A\theta_2/A\theta_1$	$J . 10^3$
Oxygène.					
Densité constante.					
770	18	0,49	429	»	0,05
932	80	0,48	455	105	0,05
Pression constante.					
770	18	0,49	429	»	»
771	80	0,44	425	98	»
Air atmosphérique.					
Densité constante.					
781	19	0,83	395	»	»
942	80	0,70	336	85	0,10
781	22	1,30	444	»	»
942	80	1,20	363	82	0,14
779	17	1,57	472	»	»
934	80	1,19	360	76	0,16
Pression constante.					
773	20	1,76	467	»	»
773	80	1,26	338	72	0,18

E. B.

MESURES

***Sur la mesure directe du temps et quelques applications pratiques.* — H. C. Steidle.** — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 16 août 1906.

Une méthode a été indiquée par Radacowic pour la mesure du temps par un procédé électrique. Les armatures d'un condensateur sont reliées à une source de courant : une résistance aussi peu inductive que possible est placée en parallèle : chaque branche contient un interrupteur, l'un S_1 coupant les deux circuits en paral-

lèle (condensateur et résistance ohmique) et l'autre S_2 le circuit du condensateur seul. Ces interrupteurs sont actionnés par le mécanisme dont on veut déterminer la durée de fonctionnement : on mesure la charge résiduelle du condensateur qui dépend de la durée à mesurer. D'après la valeur de la charge initiale qui dépend de la différence de potentiel aux bornes du condensateur (pendant qu'il est relié à la source) et de la résistance, et d'après la valeur de la charge résiduelle existant au bout d'un temps déterminé (les charges sont déterminées au moyen du galvanomètre balistique), on peut calculer facilement de la façon suivante la durée du phénomène étudié.

Si l'on désigne par Q_o la charge du condensateur C lorsque la source de courant et la résistance R sont en circuit, par t_o l'instant où l'interrupteur S_1 est ouvert et t_1 l'instant où l'interrupteur S_2 est ouvert, la charge résiduelle q du condensateur au bout du temps $t = t_1 - t_0$ est donnée par l'équation

$$q = Q_0 e^{-\frac{t}{RC}}.$$

La durée de la perte de charge est donnée par la formule :

$$t = CR \log (Q_0/q).$$

En employant le dispositif indiqué et en appliquant cette formule, Radacowic a pu mesurer les vitesses des projectiles des armes modernes suivant des longueurs de 8 en 8 centimètres prises sur leur trajectoire : il a mesuré ainsi avec une exactitude absolue des durées de l'ordre du dix-millième de seconde. La même méthode peut être appliquée à un grand nombre de mesures, telles que celle des durées de chute en chute libre, des durées de fonctionnement d'appareils électromagnétiques, etc. L'auteur a étendu ces mesures à la détermination des durées de fonctionnement de différents appareils et relais employés en télégraphie, ainsi qu'à la détermination de coefficients de self-induction.

Fonctionnement de différents types de relais. — Pour l'étude du fonctionnement de différents types de relais, l'auteur fait un certain nombre d'études préliminaires en employant le montage indiqué par la figure 1. Un poids, soutenu par un électro-aimant M, est brusquement abandonné et actionne les interrupteurs destinés à rompre les circuits de mesure. L'un des contacts I de l'interrupteur double H est fixe ; le second II est mobile, et la course du bras K peut être réglée au moyen de la vis S ; l'intervalle entre les ruptures de circuits produites en I en II par

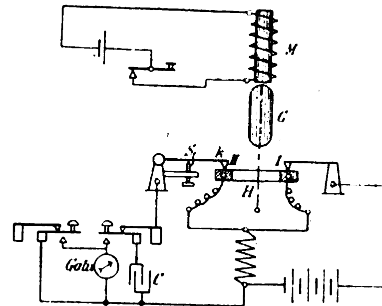


Fig. 1.

la chute des poids peut dont être réglé à volonté et peut être extrêmement court. Avec ce dispositif, l'auteur a déterminé la constante de l'appareil de chute et a trouvé, par une série de mesures, que cette constante est de

$$t_c = 0{,}000029 \pm 0{,}000008 \text{ seconde}.$$

Le dispositif de mesure avec le mécanisme de chute adopté présente, pour les déterminations de temps de l'ordre du millième de seconde, une exactitude relative de 1 °/₀. L'intervalle de temps qui s'écoule entre les deux ruptures de contact à l'interrupteur double H est en moyenne de 3×10^{-5} seconde.

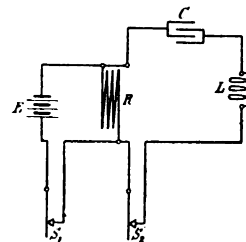


Fig. 2.

Pour avoir une idée nette des conditions de décharge, l'auteur a fait l'expérience suivante. Un condensateur de mesure C, un étalon de self-induction L sans fer et présentant des pertes dans le cuivre aussi faibles que possible, et une résistance purement ohmique R forment un circuit oscillant : en dérivation sur la résistance ohmique R est placée une source de courant E produisant une différence de potentiel e. Dans le circuit de la batterie est placé l'un des contacts de rupture d'un pendule de Helmholtz : dans le circuit

oscillant est placé l'autre contact de rupture de ce pendule de telle façon que, par suite de la chute du pendule sur les clés S_1 et S_2, le circuit de la batterie d'abord, puis le circuit oscillant, soient interrompus. L'intervalle de temps écoulé entre les ouvertures des deux circuits est réglable au moyen de vis micrométriques placées sous les dispositifs de contact. Au temps $t = 0$, on a $q = Q_0$ et $i = 0$. Si les constantes sont choisies de telle façon que l'on ait

$$(R + r)^2 < 4L/c,$$

le phénomène oscillatoire peut être représenté par les équations suivantes :

$$\alpha = \alpha_0 e^{-\frac{R+r}{2L}t}\left[\cos \varphi t + \frac{R+r}{2L\varphi} \sin \varphi t\right] \quad (1)$$

$$\varphi = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{(R+r)^2}{4L^2}} \quad (2)$$

$$\varphi = \frac{2\pi}{\tau}. \quad ( )$$

La durée d'oscillations est donnée par l'équation suivante :

$$\tau = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{(R+r)^2}{4L^2}}}. \quad (4)$$

La courbe de charge est donnée par l'équation :

$$\alpha = \alpha_0 e^{-\frac{R+}{2L}t}. \quad (5)$$

Avec l'aide des formules précédentes, l'auteur a calculé les points nettement déterminés par l'observation, de la courbe de l'onde engendrée dans un circuit ayant les constantes suivantes : $R = 4{,}58$ ohms ; $L = 0{,}0100$ henry ; $C = 1$ microfarad (condensateur en mica) ; résistance de pertes r. On a :

$$\tau = \frac{2\pi\sqrt{CL}}{1 - \frac{1}{2}\frac{C(R+r)^2}{4L}} = 6{,}2848.10^{-4} \text{ seconde}. \quad (6)$$

Par suite des erreurs que l'on peut commettre dans la mesure des constantes C et L, la valeur de τ est incertaine à la sixième décimale. Donc on peut employer le nombre simplifié

$$\tau = 6{,}28.\ 10^{-4}.$$

On trouve ainsi pour les déviations α aux différents points de d'inversion des courbes les valeurs suivantes :

$$\alpha = \alpha_0 e^{\frac{R}{4L}\tau} = \alpha_0 e^{\frac{4{,}58}{0{,}04}.6{,}28.10^{-4}} \quad (7)$$

$$\alpha_1 = -\alpha_0 . 0{,}9307 = -139{,}6 \quad (\alpha_0 = 150)$$
$$\alpha_2 = +\alpha_1 . 0{,}9307 = +130{,}2$$
$$\alpha_3 = -\alpha_2 . 0{,}9307 = -121{,}0$$
$$\alpha_4 = -\alpha_3 . 0{,}9307 = +113{,}0.$$

Ces valeurs sont indiquées dans le tableau I en comparaison des valeurs observées.

TABLEAU I

N°	α		N°	α		$\alpha_0 : \alpha_\tau$	
	OBSERVÉ	CALCULÉ		OBSERVÉ	CALCULÉ	d'après les observations	d'après le calcul
1	+ 150,0	+ 150	14	+ 103	»		
2	+ 135	»	15	+ 56	»		
3	+ 85	»	16	— 9	»		
4	+ 7	»	17	— 63	»	1,195	1,155
5	— 60	»	18	— 101	»		
6	— 111	»	19	— 110,0	— 121		
7	— 132,0	— 139	20	— 86	»		
8	— 113	»	21	— 40	»		
9	— 62	»	22	+ 18	»		
10	+ 35	»	23	+ 69	»		
11	+ 68	»	24	+ 102	»		
12	+ 113	»	25	+ 106,0	+ 113		
13	+ 126,0	+ 130	26	+ 80	»		

La comparaison entre les valeurs calculées et observées indique un écart dans l'amortissement par suite duquel, lors du phénomène de décharge, une résistance de perte de 1,1 ohm se manifestait, comme l'indique la courbe

$$R + r = \frac{2L \log (\alpha_0/\alpha_\tau)}{\tau} \quad (8)$$

Cette variation de la résistance de frottement du circuit oscillant n'a pas d'influence sur la valeur indiquée ($6{,}28.\ 10^{-4}$) pour la durée d'oscillation τ, puisque celle-ci a été déterminée en négligeant la résistance ohmique. Donc l'intervalle de temps entre deux points successifs d'oscillation a pour valeur $6{,}28.\ 10^{-4}$ seconde.

(A suivre). E. B.

CHARTRES — IMPRIMERIE DURAND, RUE FULBERT.

Le Gérant : J.-B. NOUET.

Tome XLVIII. Samedi 29 Septembre 1906. 13e Année. — N° 39.

L'Éclairage Électrique

REVUE HEBDOMADAIRE DES TRANSFORMATIONS

Electriques — Mécaniques — Thermiques

DE

L'ÉNERGIE

DIAGRAMME GÉNÉRAL DES COURANTS TRIPHASÉS (1)

Nous nous proposons de reprendre, pour l'étendre et la complèter, l'étude du diagramme général des courants alternatifs publiée antérieurement (2) et d'appliquer ce diagramme à toutes les machines triphasées connues, générateurs, moteurs, convertisseurs et régulateurs d'induction.

Tant que l'on veut baser sur des diagrammes vectoriels le calcul de machines et d'appareils à courants alternatifs, nous pensons, après avoir fait des calculs vérificatifs, que les diagrammes donnés par nous répondent pratiquement d'une façon suffisamment exacte aux conditions réelles tout en étant très simples. Tout à fait rigoureusement, le fonctionnement de machines à courants alternatifs ne peut être exposé que par la représentation de l'allure périodique dans le temps et dans l'espace des flux, des ampère-tours, des courants, des tensions, etc.

Nous ne pensons pas que les théories qui laissent entièrement de côté les ampère-tours et n'envisagent que les forces électromotrices s'approchent plus de la vérité. Dans l'enroulement induit, il n'y a pas, en réalité, différentes forces électromotrices induites, mais une seule force électromotrice induite due au flux de l'induit qui, évidemment, ne contient pas le flux de dispersion secondaire et pour le calcul duquel il faut tenir compte de la réaction et de la distorsion (3).

---

(1) Publié par la Revue *Electrotechnik und Maschinenbau*, août 1906.

(2) *Éclairage Électrique*, tome XXXIX, 25 juin 1904, page 481, et tome LI, 2 juillet 1905, page 5.

(3) Rigoureusement, le diagramme de générateur de la figure 1 n'est valable que pour un rapport de l'arc polaire pas au polaire égal à l'unité.

Dans tous les diagrammes, la tension et les courants sont calculés par phase ; les ampère-tours et les flux magnétiques sont comptés par pôle.

1° Le diagramme d'un *générateur polyphasé* synchrone ordinaire est représenté par la figure 1 (¹). Les données sont la différence de potentiel aux bornes E_k, le courant J et l'angle φ. On ajoute à E_k parallèlement à J la chute ohmique Jw (²) et l'on obtient la force électromotrice E. Le flux K_a dans l'enroulement induit est perpendiculaire à E. Il est donné par l'équation :

$$E = cnZK_a 10^{-8}. \qquad (1)$$

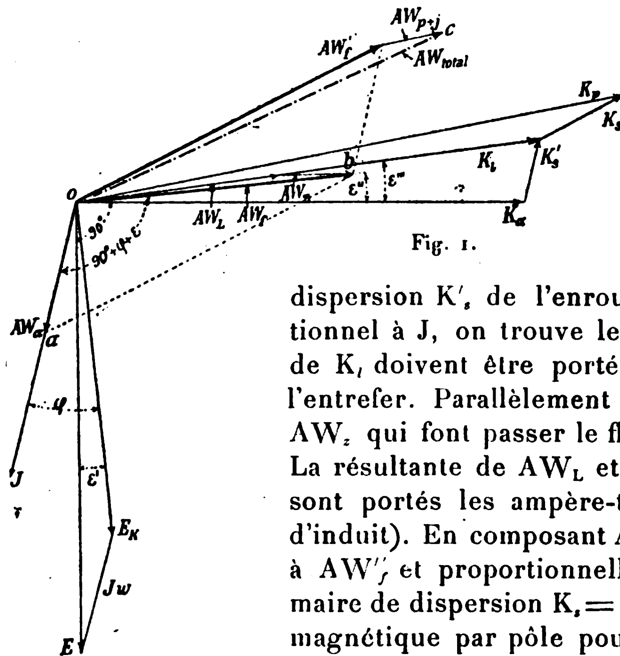


Fig. 1.

Dans cette formule, c est le facteur de tension (2,3 à 1,85), n la fréquence, Z le nombre de conducteurs effectifs par phase. Si l'on ajoute à K_a le flux de dispersion K'_s de l'enroulement induit, qui est parallèle et proportionnel à J, on trouve le flux K_l dans l'entrefer. Dans la direction de K_l doivent être portés les ampère-tours AW_L correspondant à l'entrefer. Parallèlement à K_a doivent être portés les ampère-tours AW_z qui font passer le flux K_a dans les dents et le noyau de l'induit. La résultante de AW_L et AW_z est AW_f. Sur le vecteur de courant J sont portés les ampère-tours résultants de l'induit AW_a (réaction d'induit). En composant AW_a et AW_f, on obtient AW'_f. Parallèlement à AW'_f et proportionnellement à cette grandeur, on a le flux primaire de dispersion $K_s = 1{,}26.\, AW'_f . \Lambda_m$ en appelant Λ_m la perméabilité magnétique par pôle pour le flux de dispersion K_s. De K_l et K_s, on déduit le flux K_p dans le pôle et la culasse. De celui-ci, on tire les ampère-tours AW_{p+j} pour le pôle et la culasse, que l'on ajoute à AW'_f pour obtenir les ampère-tours totaux nécessaires par pôle.

Dans beaucoup de cas, le diagramme exact de la figure 1 peut être remplacé par le diagramme approché de la figure 2. La courbe I est la caractéristique à vide ordinaire, c'est-à-dire représente la force électromotrice E en fonction des ampère-tours inducteurs $AW_f + AW_{p+j}$ en tenant compte du flux de dispersion primaire K_s approximativement proportionnel à AW_f. De la différence de potentiel aux bornes E_k donnée, on déduit la grandeur de E, par addition géométrique de Jw parallèle à J et de E_s perpendiculaire à J : E_s est la tension de dispersion proportionnelle au flux de dispersion de l'induit K'_s. A la force électromotrice E correspond le flux désigné par K_l sur la figure 1, c'est-à-dire que l'on a maintenant :

$$E = cnZK_l 10^{-8}. \qquad (2)$$

A la force électromotrice E correspondent, sur la caractéristique à vide I, les ampère-tours

(¹) Pour que cette étude soit complète et cohérente, les diagrammes qui sont semblables à ceux de l'étude précédente de l'auteur ont été reproduits à nouveau. N. D. L. R.

(²) La résistance w est $w = \sigma \frac{l_m Z}{q} 1{,}2$: $\sigma = 0{,}02$ approximativement, Z est le nombre de conducteurs en série par phase, q la section des conducteurs (tous les conducteurs en parallèle), l_m la longueur moyenne par conducteur, comprise entre $l + 1{,}3\tau + 2$ centimètres et $l + 1{,}6\tau + 5$ centimètres suivant la tension, l la longueur axiale (totale) du fer, τ le pas polaire. Le coefficient 1,2 tient compte des bornes, des soudures, des courants de Foucault, etc. Pour les induits tournants, il y a encore la résistance de passage des balais.

AW_{ft}, auxquels il faut ajouter, sous l'angle $(90 + \varphi + \varepsilon)$ les ampère-tours de réaction AW_a : on obtient ainsi les ampère-tours totaux AW_{total} par pôle inducteur. Si l'on cherche sur la courbe I la force électromotrice E_x qui correspond à AW_{total} et si l'on soustrait E_k, la différence $E_x - E_k = r$ représente l'élévation de tension qui résulte de la suppression de la charge J.

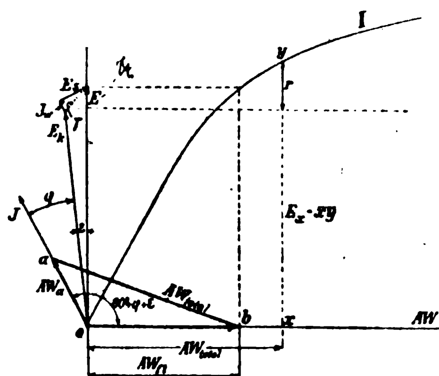


Fig. 2.

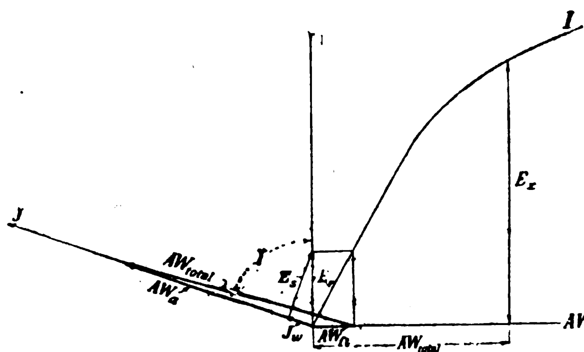


Fig. 3.

Quand la machine triphasée est en court-circuit, on a le diagramme de la figure 3. La différence de potentiel aux bornes E_k devient nulle : on additionne Jw dans la direction de J et E_s perpendiculaire à J et l'on obtient la force électromotrice résultante E_r, de laquelle on déduit, d'après la caractéristique I, les ampère-tours AW_{ft}. Dans la direction de J sont les ampère-tours de l'induit AW_a qui, additionnés à AW_{ft}, donnent les ampère-tours totaux AW_{total}. L'angle γ (fig. 3 et 2) est pratiquement constant pour tous les courants et toutes les différences de potentiel aux bornes; on a :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{E_s}{Jw} = \frac{2\pi n L J}{Jw} = \frac{2\pi n L}{w} = \frac{\text{réactance}}{\text{résistance}}.$$

Les valeurs des vecteurs du diagramme qui manquent encore sont rappelées brièvement ci-dessous : La valeur maxima de la réaction d'induit est :

a) $$AW_a = k \frac{JZ}{4p}.$$

k pour des courants triphasés et une encoche par pôle et par phase a pour valeur 2,5 à 2,7 ; pour deux encoches et plus par pôle et par phase, il a pour valeur 2,4 à 2,6. Généralement l'expression suivante, qui, en elle-même, n'est rigoureuse que pour la valeur moyenne des ampère-tours donne de bons résultats :

$$AW_a = 0{,}58 p' \frac{JZ}{4p} \frac{\sin\left(\frac{P}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{P/\tau} f_w = k \frac{JZ}{4p}, \tag{3}$$

En désignant par p' le nombre de phases, par J le courant par phase, par Z le nombre de conducteurs effectifs par phase, par $2p$ le nombre de paires de pôles, par P/τ le rapport de l'arc polaire au pas polaire, par f_w le facteur d'enroulement, compris entre 0,83 et 1 suivant le genre d'enroulement et le nombre d'encoches.

b) $$E_s = 2\pi n L J = 2{,}2 n Z K_i' 10^{-8}, \tag{4}$$

L étant le coefficient d'induction (self-induction et induction mutuelle), que l'on peut remplacer de la façon suivante :

$$\left.\begin{aligned} E_s &= 2\pi n \frac{Z^2}{4pq} \Lambda (1 + c_g + c_p) J \cdot 10^{-8} \\ &= 1{,}6 \frac{nZ^2}{pq} \Lambda (1 + C) J \cdot 10^{-8}. \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

q désigne le nombre d'encoches par pôle et par phase, c'est-à-dire par groupe de bobines ; Λ est égal à 1,26 fois la perméabilité magnétique du flux K'_s autour d'une bobine ; c_g tient compte de l'induction mutuelle des autres bobines de la même phase, et c_p de celle des autres phases. Le flux de dispersion de l'induit est donné par la formule :

$$K'_s = 0{,}7 \frac{JZ}{pq} \Lambda (1 + C). \quad (6)$$

La perméabilité Λ est composée d'un certain nombre de termes suivant l'équation :

$$\Lambda (1 + C) = l_e \lambda_e (1 + C) + l_s \lambda_s (1 + C') + \lambda_p, \quad (7)$$

en appelant l_e la longueur axiale active de l'induit, l_s la longueur d'une jonction frontale augmentée de toute la longueur non active de l'induit (¹), λ_e la perméabilité magnétique autour, d'une bobine par centimètre de longueur de fer, λ_s la perméabilité magnétique autour d'une bobine par centimètre de longueur libre d'enroulement. C tient compte de l'induction mutuelle totale sur la longueur de fer et C′ pour les jonctions frontales : λ_p est la perméabilité magnétique pour la dispersion des pôles, représentée par la figure 4, qui passe sur les faces latérales du noyau de fer actif à la profondeur des encoches $h_t = h_1 + h_2 + h_3$ (figure 5), comme la dispersion frontale des pôles inducteurs ordinaires : la dispersion est maxima à l'entrefer et nulle au fond de l'encoche ; elle est fortement amortie par les courants de Foucault.

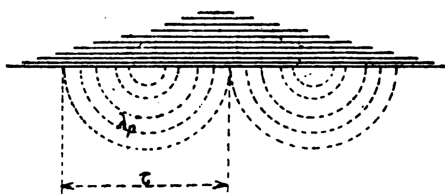


Fig. 4.

En se reportant aux notations de la figure 5, on a :

$$\lambda_e = 0{,}8 \frac{h_1}{b_1} + 2{,}6 \left(\frac{h_2}{b_2} + \frac{h_3}{b_3} \right) + 3 \frac{b_4}{1{,}6 b_4 + 2 b_3} + 0{,}6 \frac{b_4}{\delta} \frac{P}{\tau}. \quad (8)$$

Le dernier terme ne s'applique qu'au cas où les masses polaires sont feuilletées, et disparaît pour les masses polaires pleines. Pour trois phases, on a :

$$\lambda_p = 0{,}4 h_t q. \quad (9)$$

On a en outre :

$$\lambda_s = 0{,}8 \log \left(\frac{2 l_s}{s} \right) - 0{,}2, \quad (10)$$

s étant la diagonale de la section, supposée rectangulaire, d'une jonction frontale.

Si l'encoche est fermée à sa partie supérieure par une isthme de métal d'épaisseur δ', on a, au lieu des deux derniers termes additionnels dans l'expression de λ_e, la valeur :

$$2{,}8 \frac{B_x l_e \delta'}{ZJ} pq, \quad (11)$$

en indiquant par B_x l'induction dans l'isthme (comprise entre 20 000 et 30 000).

Les coefficients C et C′ qui tiennent compte de l'induction mutuelle dépendent beaucoup

(¹) l_s est la longueur libre de la portion d'un conducteur non entourée de fer.

du mode de construction de la machine. On peut en moyenne, pour des machines triphasées, adopter les valeurs suivantes :

pour $q =$	1	2	3	4	> 4
$1 + C =$	1,3	1,7	1,8	1,9	2,2
$1 + C'$	1,1	1,7	2,0	2,2	3,0.

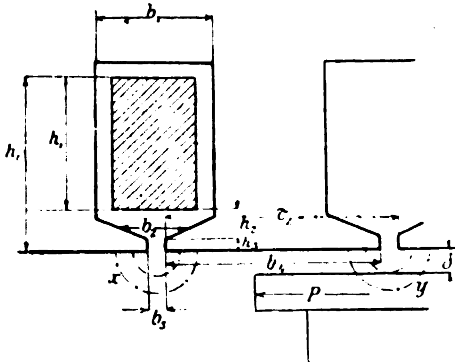


Fig. 5.

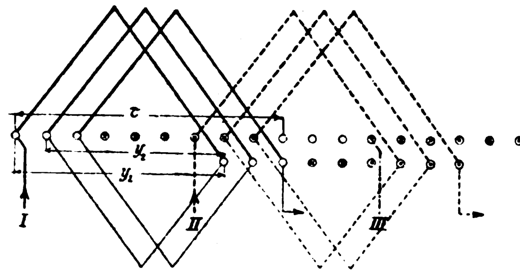


Fig. 5 a.

Si l'enroulement est fait en deux couches comme dans les enroulements à courant continu, on a :

$$\lambda_e = \frac{h_1}{b_1}(1 + 0{,}5\nu) + 2{,}6\left[\left(\frac{h_2}{b_2} + \frac{h_3}{b_3}\right) + 3\,\frac{h_4}{1{,}6b_4 + 2b_3} + 0{,}6\,\frac{b_4}{\delta}\,\frac{P}{\tau}\right](1 + \nu), \qquad (8_a)$$

λ_p et λ_s restant les mêmes que précédemment, h_t désignant toujours la profondeur totale de l'encoche et s la diagonale de la section de la jonction frontale d'une bobine. La grandeur de ν dépend du rapport :

$$\frac{\text{pas d'enroulement}}{\text{pas polaire}} = \frac{\text{largeur de bobine}}{\text{pas polaire}} = \frac{y_2}{\tau} \text{ (fig. } 5_a).$$

On a pour ν les valeurs suivantes en fonction des valeurs de y_2/τ :

$y_2/\tau =$	0,56	0,67	0,78	0,89	1
$\nu =$	0,17	0,5	0,67	0,83	1.

Si ν devient négatif, on pose simplement en première approximation $\nu = 0$. Le facteur ν tient compte du fait que, pour un pas raccourci, des conducteurs de différentes phases se trouvent ensemble dans une encoche, ce qui produit une réduction importante de la dispersion. Par exemple, sur la figure 5_a, qui représente un enroulement triphasé en boucles, le pas d'enroulement est raccourci à 78 % du pas polaire. Pour l'enroulement en deux couches, on a en outre :

$$E_s = 0{,}8\,\frac{nZ^2}{pq}\,\Lambda(1 + C)\,J\,.\,10^{-8} \qquad (5_a)$$

et

$$K'_s = 0{,}35\,\frac{JZ}{pq}\,\Lambda(1 + C). \qquad (6_a)$$

Pour les applications pratiques, on peut réduire les formules de E_s en la formule suivante [1] :

$$\mathbf{E_s = \frac{nZ^2}{p}(al_e + b\tau)\,J10^{-8}}, \qquad (11)$$

dans laquelle a est compris entre 3 et 15 et a pour valeur 7 en moyenne, et b, compris entre 1,0 et 4,0, peut être pris égal à 1,5 en moyenne.

(A suivre.) F. NIETHAMMER.

(1) La formule $E_s = a_1 \frac{nZ^2}{p} l.J.10^{-8}$ est encore plus simple, mais moins exacte. a_1 est compris entre 5 et 20 et est égal à 10 en moyenne ; a_1 augmente proportionnellement à τ/l, l désignant la longueur axiale du fer de l'induit.

INSTALLATIONS DE TRACTION ÉLECTRIQUE AU SIMPLON

L'exploitation de la voie ferrée du tunnel du Simplon est assurée, comme on le sait déjà [1], par des locomotives électriques. La Société Brown Boveri avait pris, à la fin de 1905, l'engagement d'avoir terminé pour l'ouverture du tunnel tous les travaux relatifs à l'exploitation de la voie ferrée par l'électricité, et elle a tenu parole, malgré le délai extrêmement court dont elle disposait. C'est ce délai très court qui, comme nous l'avons déjà dit, a déterminé l'adoption du système triphasé, car la maison Brown Boveri venait d'achever la construction de deux locomotives triphasées, primitivement destinées à la Valteline, et l'administration des chemins de fer de l'Adriatique consentait à prêter trois autres locomotives, modèle Ganz et Cie, en service sur cette ligne, pour contribuer à assurer le service en attendant l'achèvement d'autres locomotives Brown Boveri.

De même, c'est à cause du délai réduit que l'on a été obligé d'utiliser, avec quelques légères modifications, pour la production de l'énergie électrique nécessaire, les usines génératrices provisoires établies à Brigue et à Iselle pour l'alimentation des machines employées au percement du tunnel : au point de vue de la sécurité du fonctionnement, il aurait été plus avantageux de remplacer ces deux usines par une station centrale unique.

Nous allons passer rapidement en revue les installations électriques des usines génératrices, les lignes d'alimentation et de travail desservant la voie ferrée, et enfin les détails de construction des locomotives triphasées Brown Boveri.

Usines génératrices.

L'*usine génératrice de Brigue* contient deux turbines hydrauliques de Escher Wyss et Cie, alimentées par l'eau du Rhône, qu'amène une conduite forcée de 1 600 mètres de longueur environ. Chaque turbine présente une puissance de 500 chevaux à la vitesse de rotation de 160 tours par minute pour une hauteur de chute effective de $44^{m},60$ d'eau. Un arbre, sur lequel sont calées les roues mobiles de ces deux turbines, traverse une cloison et pénètre dans la salle des machines où il entraîne un alternateur de 1 200 chevaux (fig. 1), produisant des courants triphasés à 3 300 volts et 16 périodes. Le rotor en acier coulé porte douze pôles venus de fonte avec le volant : les masses polaires maintiennent les enroulements inducteurs et sont tenues par des fixations en queue d'aronde et des vis. Les bobines inductrices, formées d'un ruban de cuivre enroulé sur champ, sont maintenues appuyées contre les masses polaires par l'action de bagues et de ressorts placés au-dessous d'elles. L'induit fixe, boulonné dans une carcasse en fonte, ne présente rien de particulier; la ventilation et l'isolement ont été particulièrement soignées, cette machine devant travailler toujours à pleine charge, comme on le verra plus loin, et dans une atmosphère humide.

Les deux turbines ne possèdent pas de dispositif de réglage : il a donc fallu, en l'absence de régulateur, recourir à un artifice spécial pour éviter des élévations de vitesses dangereuses en cas de décharge brusque du générateur. L'artifice consiste à faire travailler ce générateur toujours à pleine charge grâce à l'emploi d'une résistance liquide automatiquement réglable sur laquelle il débite lorsque la ligne est déchargée. Cette résistance liquide est formée d'un puisard en béton où circule de l'eau, et dans lequel plongent des électrodes

[1] Voir *Éclairage Électrique*, tome XLVI, 24 mars 1906, page 456.

en fer. Un régulateur électrique automatique provoque le déplacement d'une des électrodes afin de donner au rhéostat liquide une résistance telle que le générateur travaille toujours à pleine charge.

Le courant continu nécessaire à l'excitation du générateur est fourni par deux dynamos à courant continu de 95 chevaux, produisant une différence de potentiel de 125 volts, et employées à l'éclairage du tunnel pendant les travaux de percement. Ces machines tournent à une vitesse de rotation de 500 tours par minute et sont entraînées par courroies par l'arbre des turbines : elles sont représentées par la figure 2. L'inducteur de ces dynamos génératrices est tétrapolaire et compound : il porte quatre bobines shunt de 539 tours de fil de $2^{mm},9$ et quatre bobines série de trois tours de ruban de cuivre.

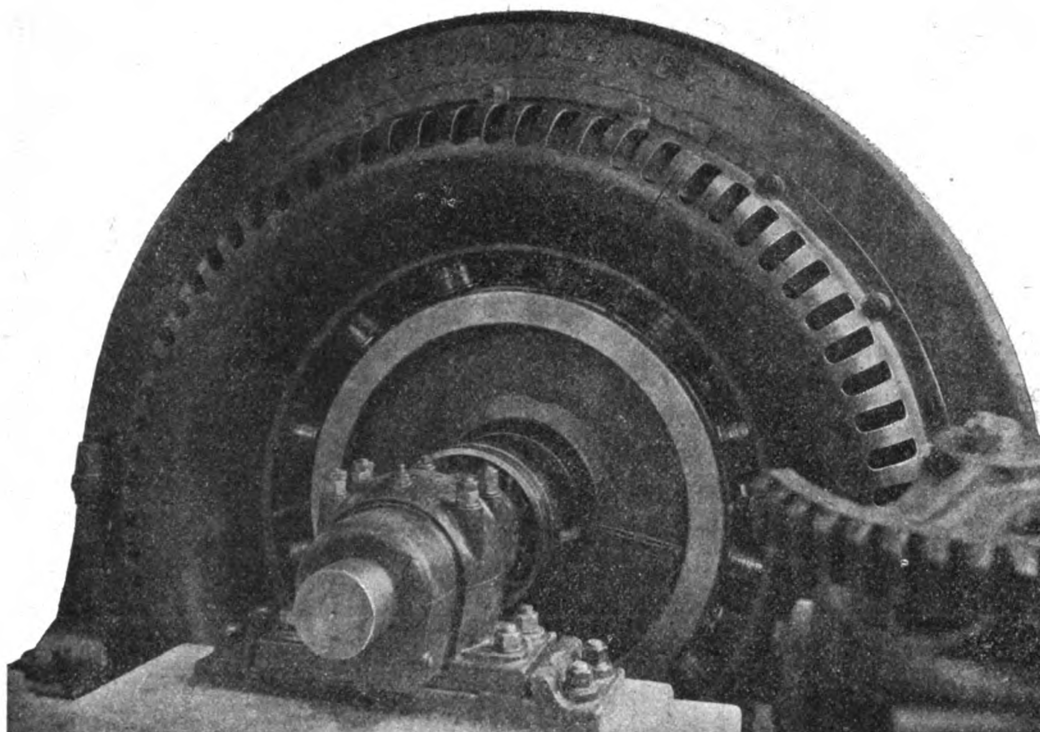


Fig. 1. — Alternateur triphasé de 1 200 chevaux de l'usine génératrice de Brigue.

Un tableau très simple, comprenant trois panneaux, porte tous les appareils de réglage et de mesure. Le panneau du milieu dessert le générateur, celui de gauche dessert la ligne du tunnel, alimentée directement sous 3 300 volts ; celui de droite dessert la gare de Brigue. Un disjoncteur à maxima est intercalé sur le départ de la ligne du tunnel.

L'*usine génératrice d'Iselle* utilise l'eau de la Diveria et a été profondément modifié pour l'exploitation de la voie ferrée. Une conduite forcée de 90 centimètres de diamètre amène l'eau qui présente une hauteur de chute effective de 140 mètres. Deux turbines centrifuges Piccard et Pictet produisent chacune 750 chevaux en tournant à la vitesse de 960 tours par minute. Ces deux turbines sont calées en porte à faux aux extrémités de l'arbre d'un alternateur qui, à cause de la grande vitesse de rotation, est d'une construction tout à fait semblable à celle des alternateurs entraînés par des turbines à vapeur. Le groupe total ne pos-

sède que deux paliers, qui sont graissés par une circulation d'huile sous pression. Les turbines sont réglées par un régulateur très sensible avec servo-moteur à huile comprimée ; elles sont munies de vannes de décharge évitant toute compression dans la conduite d'eau au moment des décharges brusques du générateur électrique. Celui-ci produit des courants triphasés à 3 300 volts et 16 périodes. L'huile comprimée nécessaire au servo-moteur et au graissage est fournie par une pompe à deux pistons.

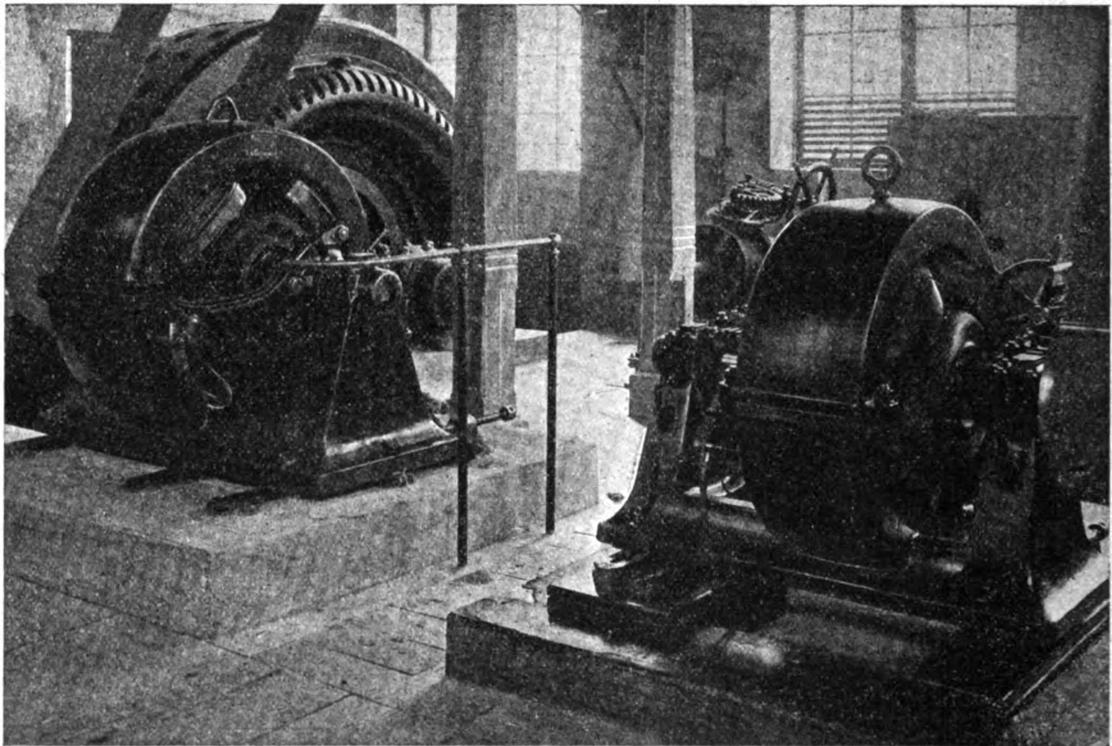


Fig. 2. — Excitatrices de 95 chevaux, 125 volts, de l'usine génératrice de Brigue.

Le courant d'excitation nécessaire à l'alternateur triphasé est fourni, comme à Brigue, par une dynamo génératrice à courant continu de 95 chevaux produisant une différence de potentiel de 125 volts et servant à l'éclairage lors des travaux de percement.

Les jonctions des deux usines génératrices entre elles et avec la ligne du tunnel sont établies de telle façon que les générateurs de Brigue et d'Iselle puissent travailler en parallèle sur l'installation totale, ce qui est le cas du service normal, ou puissent alimenter chacun individuellement la ligne du tunnel.

Lignes d'alimentation.

L'une des phases des courants triphasés est directement connectée aux rails de roulement éclissés, à cet effet, au moyen de joints Edison-Brown. Ces joints donnent d'excellents résultats, et leur résistance ohmique est très faible. Ils sont constitués par une sorte de mastic métallique adhérent que l'on emprisonne entre les éclisses ordinaires et les rails, après avoir décapé fortement les surfaces au moyen de sable projeté par une soufflerie à air comprimé

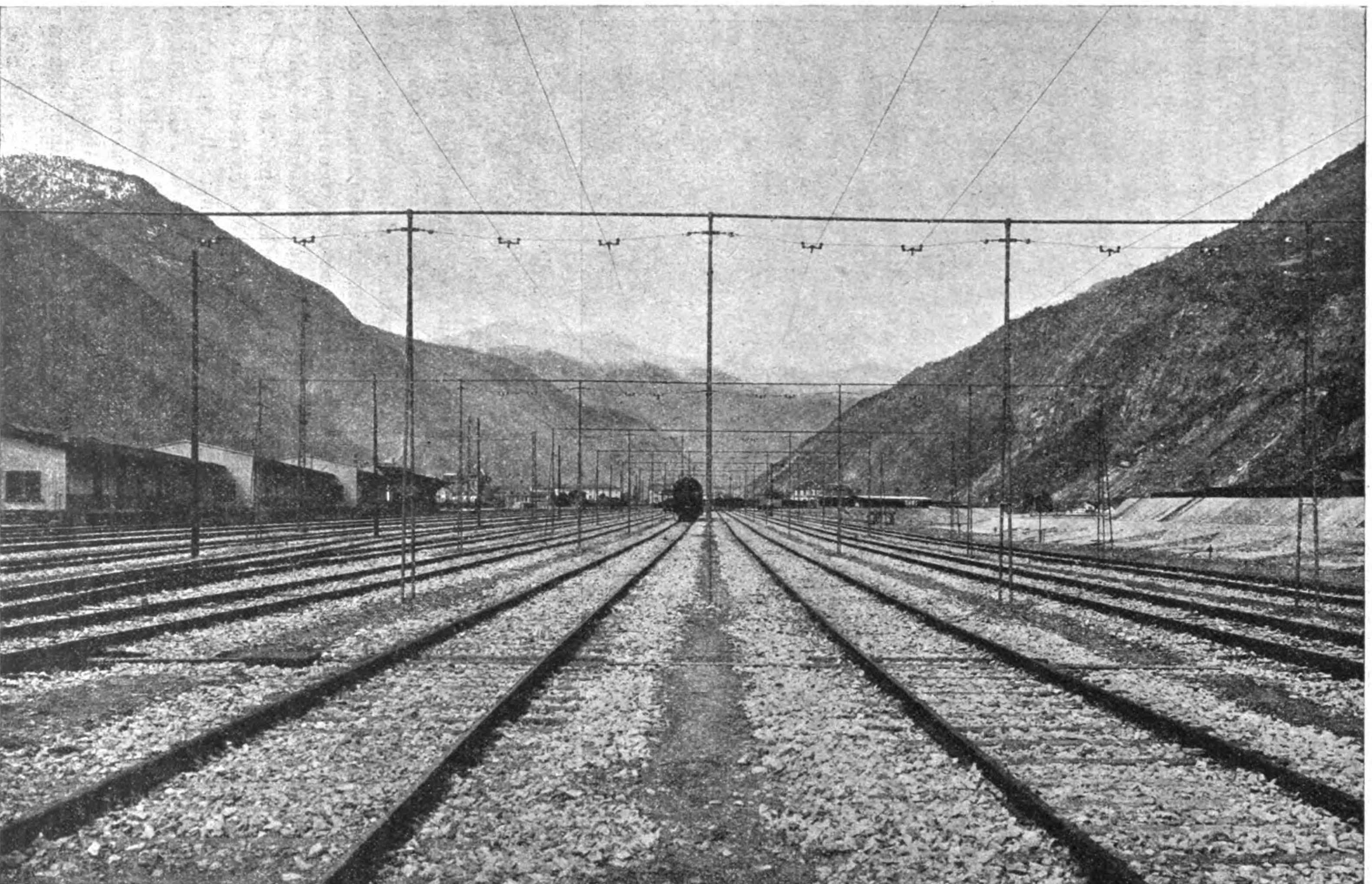


Fig. 3. — Suspension de la ligne de contact (gare de Brigue).

que porte une voiture spéciale. Les deux autres phases sont connectées à une ligne aérienne double sur laquelle frottent les organes de prise de courant des locomotives. La ligne totale est divisée en cinq sections indépendantes : la première va de la station de Brigue à l'entrée du tunnel ; la deuxième dessert la moitié nord du tunnel ; la troisième la voie d'évitement située au milieu du tunnel[1], la quatrième la moitié sud du tunnel ; enfin la cinquième s'étend de la sortie du tunnel à la station d'Iselle. Chaque section peut être alimentée individuellement par l'une des deux usines ou par l'ensemble des deux usines.

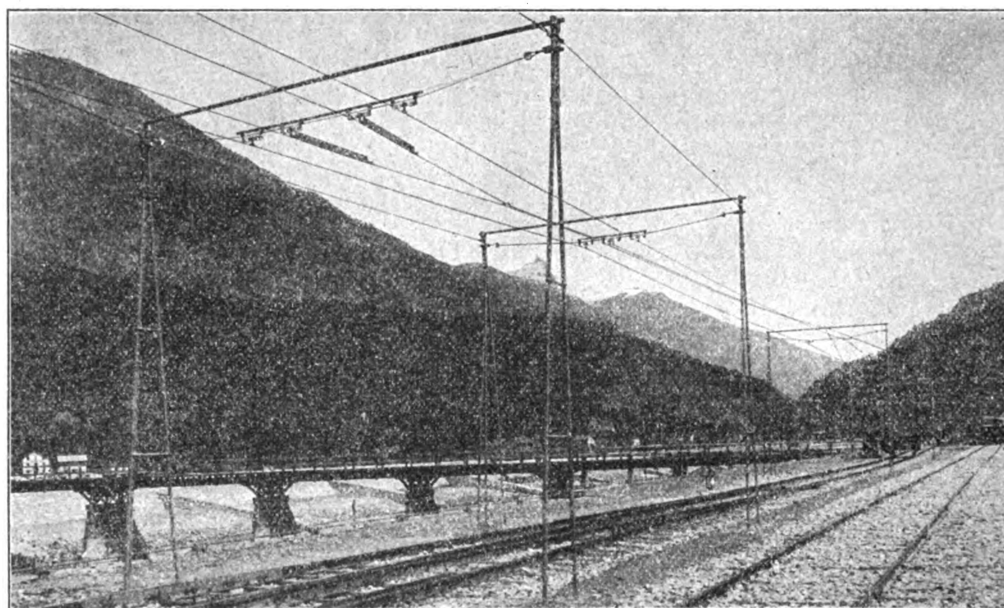


Fig. 4. — Ligne aérienne au passage d'une aiguille.

Pour la suspension des lignes aériennes d'alimentation en dehors du tunnel, on a été conduit à adopter des poteaux de très faible diamètre pour avoir la certitude que les lignes et les signaux ne seraient pas masqués éventuellement aux mécaniciens. Les supports employés sont constitués par des tubes en fer (tubes de conduites de gaz) enterrés dans des massifs en béton et formant deux par deux des chevalets étroits que relie, à la partie supérieure, un tube horizontal. La figure 3, qui représente une vue des voies à proximité de la gare de Brigue, montre ce mode de montage. La ligne aérienne est amarrée à des fils porteurs transversaux en acier galvanisé, de 6 millimètres de diamètre, fixés à ces tubes par l'intermédiaire de pièces isolantes en porcelaine. Dans les courbes, les deux tubes constituant un chevalet sont renforcés par un troisième. Des croisillons, placés à différentes hauteurs relient ensemble les trois tubes et en font un ensemble rigide. Ce mode de construction est nettement visible sur la figure 4 qui représente un aiguillage. En gare d'Iselle, les voies étant trop rapprochées les unes des autres pour permettre le placement de poteaux entre les voies, on a disposé de part et d'autre de l'ensemble des voies des pylones rectangulaires métalliques en treillis, et l'on a suspendu tous les fils à un câble transversal en

[1] Cette voie a été prévue pour permettre des croisements de trains dans le tunnel si la densité du trafic l'exige, et fera partie plus tard du tunnel de doublement que l'on percera si les nécessités du trafic l'exigent.

acier (suspension caténaire). Les pylones ont 8^{m},70 de hauteur au-dessus du sol et sont enterrés de 1^{m},50 dans des massifs en béton.

Dans le tunnel, les lignes de contact sont soutenues par des fils transversaux : ceux-ci sont en acier recouvert d'une couche de cuivre, ce qui évite leur détérioration et leur destruction par l'effet de l'humidité existant dans le tunnel. Ces fils sont fixés à des pièces en bronze cimentées dans les parois du tunnel : ils sont isolés à chacune de leurs extrémités par une pièce de porcelaine munie d'un dispositif qui permet de tendre le fil. La distance entre ces fils transversaux de suspension est de 25 mètres en alignement droit et de 12^{m},50 dans les courbes : ces portées relativement longues ont pu être adoptées à cause de la constance de la température dans le tunnel, qui a permis de donner aux fils de ligne de fortes tensions initiales.

Les fils de ligne sont placés à 5^{m},20 de hauteur environ à l'extérieur du tunnel et à 4^{m},80 dans le tunnel : l'écartement entre les deux phases est de 1 mètre environ. Ils ont 8 millimètres de diamètre (50 millimètres carrés) : à l'intérieur du tunnel chaque fil est doublé afin de présenter une plus faible chute de tension et une plus grande surface de contact (fig. 5). Pour assurer une usure régulière des archets de prise de courant des locomotives, on a disposé les fils de ligne en zigzag par rapport à l'axe de la voie.



Fig. 5. — Suspension de la ligne à l'intérieur du tunnel.

Les fils de ligne sont supportés par des isolateurs spéciaux, fixés aux fils de suspension. Ces isolateurs sont à double isolement : l'un des isolements est assuré par de l'ébonite, et l'autre par de la porcelaine : chacun des deux isolements a été essayé séparément sous 10000 volts. La construction de ces isolateurs est la suivante : une pièce en ébonite, en forme de boulon, supporte le fil de contact. Elle est elle-même fixée à une traverse en bronze soutenue à ses deux extrémités par deux isolateurs en porcelaine dans lesquels elle est enfoncée et vissée avec intercalation de chanvre et d'amiante. Les extrémités de ces isolateurs en porcelaine sont encastrées dans des pièces en bronze que l'on fixe aux fils de supports transversaux. Chaque isolateur total peut supporter une tension normale de 18000 volts : en cas de rupture d'un des isolants,

les pertes, sous la tension de 3 300 volts, sont donc absolument négligeables. Une révision périodique des isolateurs permettra, en service régulier, de reconnaître et de remplacer ceux qui présenteront des défauts, afin d'éviter toute avarie que pourraient provoquer les conditions très défavorables d'exploitation dans ce tunnel.

Les raccordements entre la ligne du tunnel et les portions de ligne extérieures ont dû être établis d'une façon particulière. En effet, le tunnel est muni de portes de fermeture destinées à permettre la ventilation au moyen de deux ventilateurs, l'un aspirant l'air du tunnel à une extrémité, et l'autre poussant cet air à l'autre extrémité.

Les portes s'ouvrent et se ferment par un mouvement vertical et sont manœuvrés électriquement. Les raccordements des lignes sont formés par des pièces de jonction isolées, supportées par des traverses en bois mobiles autour de charnières, qui se rabattent ou s'élèvent suivant que les portes se ferment ou s'ouvrent et établissent la continuité de la ligne (continuité mécanique, mais non électrique, car la faible longueur des pièces de raccordement a rendu inutile l'emploi de contacts électriques). La ligne intérieure du tunnel est raccordée aux lignes extérieures par deux jonctions traversant la paroi supérieure du tunnel à faible distance des portes.

(A suivre.) A. SOLIER.

REVUE INDUSTRIELLE ET SCIENTIFIQUE

THÉORIES ET GÉNÉRALITÉS

Phénomènes magnétiques présentés par le fer sous l'action d'oscillations électriques. — W.-H. Eccles. — *The Electrician*, 24 août 1906.

Depuis que Marconi a indiqué en 1902 que de faibles oscillations électriques peuvent modifier le flux d'induction dans un morceau de fer doux aimanté, un grand nombre d'études ont été faites pour déterminer les phénomènes en jeu dans ce cas, mais peu de chiffres précis ont été indiqués. Cela provient sans doute des difficultés expérimentales, telles que l'effet d'écran du fer produit par la présence de courants de Foucault, et la difficulté d'obtenir des oscillations bien définies. L'auteur a employé, dans ses expériences, des oscillations dont le champ magnétique avait la même direction que le champ magnétique principal, et toute difficulté due à l'effet superficiel était évitée par l'emploi d'oscillations si faibles que les couches extérieures seules du fil de fer étaient utilisées.

Dans ces expériences, on employa du fer doux de Suède vieilli, ayant passé un grand nombre de fois par un cycle magnétique défini. Le champ était alors amené à la valeur convenable et le fer était soumis à un simple train d'oscillations engendrées dans une hélice qui entourait le fil de fer. L'altération résultant dans l'intensité de pôle était observée par la déviation du miroir d'un magnétomètre. L'expérience était répétée un grand nombre de fois pour chaque point de la courbe. Les chiffres indiqués plus loin dans le tableau I sont des moyennes d'un grand nombre d'observations.

L'appareil adopté consistait en deux solénoïdes droits ayant chacun 3 270 tours de fil de cuivre enroulé en six couches sur une longueur de 59 centimètres sur un tube de laiton fendu. Ces solénoïdes étaient placés sur la même ligne magnétique *est-ouest* de part et d'autre du magnétomètre. L'aiguille de celui-ci était dans l'axe commun aux deux solénoïdes. Ceux-ci étaient reliés en série et disposés de façon que, lors du passage d'un courant de forte intensité, l'aiguille du magnétomètre ne fût pas influencée. Une résistance liquide, un milliampèremètre de Weston, les interrupteurs et commutateurs convenables et une batterie de six accumulateurs complétaient le circuit des solénoïdes. La bobine dans laquelle agissaient les oscillations électriques était formée de 1 252 tours de fil de cuivre enroulé sur une seule couche de 70 centimètres de longueur

sur un tube de verre de 5 millimètres de diamètre extérieur et présentait une résistance de 3 ohms environ. La bobine entière était enroulée dans du papier paraffiné et placée dans le tube de laiton du solénoïde *est*. Le fil de fer étudié était en fer de Suède au charbon de bois et avait $0^{mm},749$ de diamètre : il était toujours employé en longueurs de 56 centimètres. Le magnétomètre était constitué par un petit miroir suspendu à un fil de soie et portant quatre très petits aimants ; les lectures étaient faites sur une échelle distante de 88 centimètres.

Le but de l'emploi de deux solénoïdes est le suivant. En plaçant des quantités égales de fil de fer dans chaque solénoïde et en ajustant soigneusement leurs positions, la déviation du magnétomètre pouvait être rendue très faible, quelles que fussent les variations magnétiques dans le fer, l'effet d'un solénoïde compensant l'effet du solénoïde opposé.

On pouvait augmenter considérablement la sensibilité du magnétomètre, en réduisant le champ agissant sur l'aiguille au moyen d'un aimant permanent puissant. Les faibles inégalités existant dans la construction des solénoïdes rendaient impossible l'obtention d'une égalité parfaite : il y avait toujours une déflection rémanente différente en signe et en amplitude pour différentes valeurs du courant dans les solénoïdes.

Dans les expériences, on employa trois fils de fer isolés les uns des autres et rassemblés en faisceau placé dans chaque solénoïde, le faisceau placé dans la bobine *est* passant, naturellement, dans le tube de verre sur lequel était enroulée la bobine auxiliaire. Les extrémités intérieures des fils étaient distantes de 93 centimètres de l'aiguille du magnétomètre. Le champ à l'aiguille était réduit à 0,034 unités c. g. s. Avec ce dispositif, on atteignait une sensibilité telle qu'à certains jours, les orages éloignés, dont les éclairs n'étaient pas visibles à Londres, étaient nettement perceptibles au laboratoire par leurs effets sur le fer.

Les oscillations employées étaient produites en reliant l'extrémité libre *est* de la bobine oscillante — c'est-à-dire l'extrémité opposée au magnétomètre — à un éclateur micrométrique. L'autre extrémité de la bobine était isolée. Les électrodes de l'éclateur étaient reliées aux bornes d'une machine à influence : la borne non reliée à la bobine oscillante était mise à la terre. Quand l'étincelle jaillissait, des oscillations prenaient naissance dans la bobine ; la longueur d'étincelle était de un demi-millimètre, la période calculée des ondes stationnaires dans la bobine oscillante était de $5,7 . 10^{-7}$ seconde.

On opérait comme suit : le fer était désaimanté par des inversions, puis il était soumis un certain nombre de fois à un cycle d'amplitude donnée ; cette opération était arrêtée au point voulu, et on faisait jaillir l'étincelle ; la lecture au magnétomètre était faite 30 secondes après ; un cycle complet était décrit et arrêté au même point qu'auparavant, puis on répétait l'expérience et ainsi de suite. On étudiait ainsi 20 points du du cycle au moyen de quatre ou six observations pour chacun d'eux. Le tableau I résume les résultats obtenus. Les nombres au sommet de chaque colonne et dans la colonne de gauche représentant le courant dans les solénoïdes en milliampères donnent, quand on les multiplie par 0,0696, le champ magnétique en unités c. g. s. appliqué au fer. Les déviations données dans le corps du tableau indiquent les variations d'intensité de pôle, dues à l'étincelle quand on les multiplie par 0,017 ; ou bien elles donnent les variations d'intensité d'aimantation quand on les multiplie par 1,27 ; ou bien elles donnent les variations du moment magnétique total du spécimen étudié quand on les multiplie par 0,940.

TABLEAU I

COURANT EN MILLIAMPÈRES	50 CYCLES	100 CYCLES	150 CYCLES	200 CYCLES
— 150	»	»	»	0,20
— 100	»	»	0,20	0,36
— 75	»	»	»	»
— 50	»	0,27	0,44	0,68
— 40	0,06	»	»	»
— 30	0,10	»	»	»
— 20	0,13	»	»	»
0	0,28	0,68	0,92	1,22
20	0,38	1,08	»	»
30	0,45	»	1,32	1,57
40	0,60	»	»	»
50	0,55	1,26	1,51	1,71
75	»	1,30	1,62	1,75
100	»	1,18	1,57	1,55
150	»	»	1,19	0,93
200	»	»	»	0,83

Les courbes tracées d'après les chiffres de ce tableau montrent nettement comment l'effet de la même étincelle croît pour un accroissement des amplitudes des cycles. Les courbes de la figure 1 indiquent l'effet des étincelles (porté en ordonnées) en fonction du courant magnétisant :

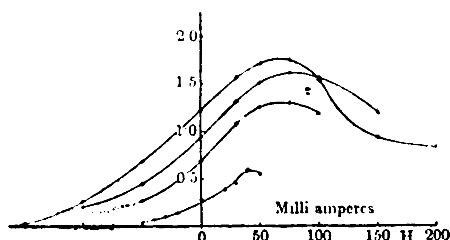


Fig. 1.

elles présentent des maxima très nets. Il est évident que l'amplitude de l'effet en un point quelconque est étroitement liée à l'inclinaison de la courbe d'hystérésis. Ces courbes tendent à confirmer le fait énoncé par Wilson que la sensibilité du fer aux oscillations est maxima quand le métal se trouve dans les conditions magnétiques représentées par le point d'inflexion de la courbe d'hystérésis.

En ce qui concerne la nature réelle des phénomènes observés, plusieurs physiciens ont exprimé leur opinion en disant que l'hystérésis est annulée par l'effet des oscillations électriques. Les résultats d'expériences de l'auteur confirment cette façon de voir. L'effet des oscillations en un point quelconque du cycle est tel que la substance semble dépourvue d'hystérésis. Ce fait peut être interprété de la même manière que l'action de vibrations mécaniques : les liens intermoléculaires qui maintiennent les molécules magnétiques dans leur configuration instantanée sont détachés pour un instant, de sorte que le champ résultant peut agir pleinement pour réorganiser les groupements moléculaires.

R. R.

GÉNÉRATION ET TRANSFORMATION

Sur le rendement de condenseurs à surface. — **R.-L. Weighton.** — *Engineering; Elektrotechnik und Maschinenbau*, 26 août 1906.

L'auteur a fait pendant plus de deux années, à l'Armstrong College de New-Castle-on-Tyne, des expériences détaillées sur le rendement des condenseurs à surface, et a communiqué à la Society of Naval Architects les principaux résultats auxquels il a été conduit. Ces résultats sont les suivants :

Le rendement d'un condenseur à surface est augmenté :

1° Quand l'eau de condensation est enlevée aussitôt après sa formation dans le condenseur ;

2° Quand le volume du condenseur est réduit autant que le permet la surface refrigérante, et quand le courant de vapeur à condenseur est amené d'une façon continue et est en contact intime avec les parois réfrigérantes ;

3° Quand l'eau de réfrigération traverse les tubes réfrigérants avec une vitesse relativement élevée, en circulant de bas en haut.

Dans un condenseur dont les dimensions ont été judicieusement déterminées, on peut observer les faits suivants :

1° La température de l'eau de circulation à la sortie du condenseur doit être égale ou peu supérieure à celle qui existe dans l'espace vide du condenseur ;

2° La température des parois du récipient ne doit pas être supérieure de plus de 2 ou 3 degrés à la température de l'espace vide ;

3° Pour un vide de 730 millimètres de mercure, il n'est pas nécessaire de donner aux pompes à air un volume supérieur à 40 décimètres cubes par kilogramme de vapeur condensée, quand le condenseur est tout à fait hermétique. Toutefois, pour les vides plus poussés ou pour le cas où le condenseur n'est pas tout à fait hermétique, le volume des pompes à air doit dépasser le chiffre indiqué ;

4° Quand on emploie des pompes à air sec, on peut obtenir une condensation d'au moins 100 kilogrammes de vapeur par mètre carré de surface réfrigérante avec un vide de 720 millimètres au moyen d'une quantité d'eau réfrigérante égale à 24 fois le poids de vapeur ;

5° Dans les mêmes conditions, on peut condenser 180 kilogrammes de vapeur avec une quantité d'eau réfrigérante égale à 28 fois le poids de vapeur.

B. L.

Moteur à combustible liquide à injection. — *Elektrotecknik und Maschinenbau*, 26 août 1906.

Les usines Körting construisent un moteur à huile à injection système Trinkler, dans lequel le combustible liquide finement pulvérisé est

projeté, directement dans la chambre de combustion où il brûle en arrivant au contact de l'air comprimé par le piston de travail.

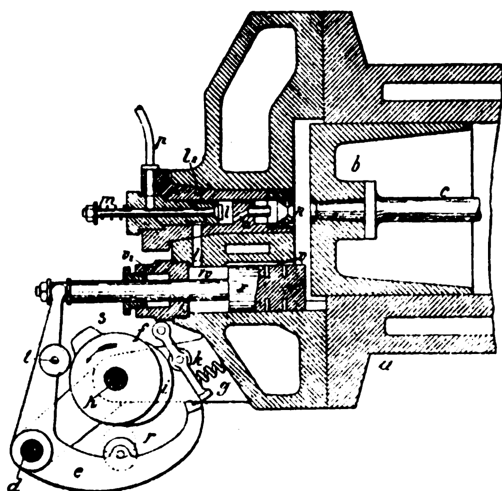


Fig. 1.

La figure 1 représente une coupe de la tête de cylindre du moteur à quatre temps et à simple effet. Le piston de travail *b* aspire dans son déplacement de l'air pur qui pénètre par la soupape d'admission, et comprime cet air à une pression de 28 à 30 atmosphères dans sa course rétrograde. La chambre *w* ménagée avant le piston d'injection *x* se remplit d'air comprimé par un canal *v* qui relie cette chambre avec la chambre de combustion. L'air comprimé passe aussi, par le canal l_1, dans l'espace existant derrière la tuyère d'injection *n*. Le combustible liquide, envoyé par une pompe dans le tuyau *p*, pénètre par *l* dans cet espace.

Vers la fin de la course de compression, le piston d'injection *x* est déplacé rapidement vers l'extérieur sous l'effet de la différence des pressions existant sur la surface tournée du côté de la chambre de compression et sur la surface annulaire existant du côté opposé : le canal *v* est bouché et l'air qui remplit la chambre *w* est chassé par l_1, *l*, *o* et *n* dans la chambre de combustion. Par suite de l'étroitesse de la tuyère et du mouvement rapide du piston *x*, l'air injecté présente une forte compression et projette le combustible dans la chambre de combustion en le pulvérisant finement : l'allumage se produit de lui-même à cause de la température élevée de l'air comprimé. Les autres phases (expansion et échappement) se produisent comme sur les autres moteurs à quatre temps.

Le démarrage de la machine est effectué avec de l'air comprimé introduit dans la machine par une soupape d'aspiration. Le réservoir à air comprimé servant au démarrage est rempli par le moteur lui-même au moyen d'une soupape de charge refroidie par l'eau de circulation de la machine.

La consommation de combustible s'élève, pour un moteur de 12 chevaux, à environ 221 grammes de naphte brut de Russie par heure et cheval effectif pour un pouvoir calorifique de 9 863 calories par kilogramme. On consomme donc 2 180 calories par cheval-heure effectif, ce qui correspond à une utilisation de 29,2 %. A demi-charge, la consommation est de 238 grammes par cheval-heure effectif, c'est-à-dire seulement 7,5 % de plus qu'à pleine charge.

B. L.

Sur le diagramme de Potier en tenant compte de la dispersion. — **Sumec.** — *Elektrotechnik und Maschinenbau*, 26 août 1906.

Les caractéristiques purement inductives d'un alternateur sont, comme l'indiquent les essais, assez exactement équidistantes de la caractéristique à vide, c'est-à-dire qu'elles sont décalées par rapport à celle-ci d'une distance AC proportionnelle au courant induit.

Cette propriété a été utilisée par Potier[1] pour séparer la dispersion de l'induit et les contre-ampère-tours de l'induit en posant, dans le triangle ABC :

$$\left.\begin{array}{l} AB = \text{f. é. m. de dispersion d'induit} \\ BC = \text{contre-ampère-tours de l'induit.} \end{array}\right\} (1)$$

Cette interprétation des résultats de mesure suppose évidemment que, pour produire une f. é. m. déterminée O_0E en charge, il faut les mêmes ampère-tours FB que pour la marche à vide EA. Cela ne correspond pas à la réalité : pour la même f. é. m. (le même champ dans l'air), la dispersion des pôles et le champ magnétique, ainsi que le nombre d'ampère-tours nécessaire pour le circuit magnétique, sont plus grandes en charge qu'à vide. On peut se demander si l'équidistance constatée dans les

[1] *L'Éclairage Électrique*, tome XXIV, 28 juillet 1900, p. 133.

essais est encore théoriquement explicable en tenant compte de la dispersion variable des pôles, et quelle est alors la signification du triangle de Potier ABC. Dans ce qui suit, l'auteur cherche à

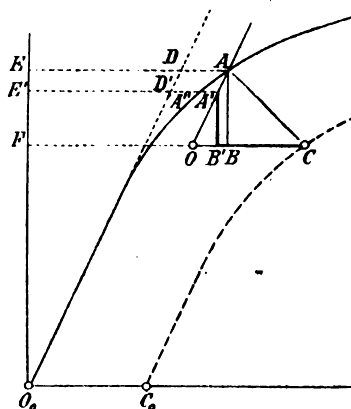


Fig. 1.

montrer que la théorie plus rigoureuse conduit aussi à l'équidistance et qu'une correction très simple du triangle de Potier suffit pour permettre de déduire les valeurs rigoureuses de la dispersion de l'induit et des contre-ampère-tours de l'induit.

La dispersion des pôles se produit en majeure partie entre lesmasses polaires : elle dépend donc de la tension magnétique existant en ces points, proportionnelle à la somme des ampère-tours pour l'air et le fer de l'induit, et des contre-ampère-tours de l'induit: pour un champ donné dans l'air (f. é. m. donnée) elle croît donc proportionnellement au courant induit. Inversement, pour un courant induit donné (caractéristique déterminée), la dispersion pour une f. é. m. quelconque (un champ quelconque dans l'air) est plus grande qu'à vide d'une quantité donnée. Autrement dit, le nombre d'ampère-tours nécessaire pour le fer des inducteurs correspond à un point de la caractéristique à vide situé plus haut, d'une quantité constante E'E. Pour la f. é. m. (champ dans l'air) O_0E' par exemple, ce n'est plus D'A'', mais DA.

Les ampère-tours totaux FC déterminés par l'essai ont donc la vérification suivante :

E'D' pour l'air et le fer de l'induit.

D'A' = DA pour le fer des inducteurs (AA' parallèle à DD').

B'C pour les contre-ampère-tours.

Comme f. é. m. induite, on ne doit pas considérer l'ordonnée O_0E' correspondant au point A, mais l'ordonnée O_0E un peu plus petite de la quantité EE', de sorte que la f. é. m. de dispersion de l'induit n'est pas AB, mais A'B'. Les différences avec le diagramme de Potier sont donc les suivantes : on doit poser :

$$\left.\begin{array}{l}A'B' = \text{f. é. m. de dispersion d'induit}\\ B'C = \text{contre-ampère-tours de l'induit}\end{array}\right\} \quad (2)$$

L'équidistance des caractéristiques subsiste, car non seulement A'B' et BC (comme dispersion d'induit et contre-ampère-tours de l'induit), mais aussi EE' (accroissement de la dispersion des inducteurs) et AA' restent constants pour une valeur donnée du courant induit. Il ne s'agit donc que de trouver la différence EE' des ordonnées.

Soit m la perméabilité magnétique sous les surfaces polaires (pour le champ dans l'air) et $\sigma_m m$ celle du circuit de dispersion des inducteurs (σ_m coefficient de dispersion des inducteurs = champ de dispersion des inducteurs divisé par le champ dans l'air) : au champ dans l'air O_0E' correspond alors à vide le champ dans les inducteurs $O_0E'(1+\sigma_m)$. Les contre-ampère-tours AW_g augmentent la dispersion des inducteurs de la quantité $\sigma_m AW_g$: au même champ dans l'air O_0E' correspond en charge le champ des inducteurs $O_0E'(1+\sigma_m)+\sigma_m m\,AW_g$.

A cette valeur plus grande du champ des inducteurs correspondrait alors inversement à vide (d'après l'équation : champ dans l'air = 1 $(1+\sigma_m)$ champ dans les inducteurs) le champ dans l'air :

$$O_0E = O_0E' + \frac{\sigma_m m AW_g}{1+\sigma_m}.$$

On a donc :

$$EE' = O_0E - O_0E' = \frac{m\sigma_m AW_g}{1+\sigma_m}.$$

D'après ce qui précède, on a $AW_g = B'C$ et m = rapport des ordonnées aux abscisses de la partie droite de la caractéristique à vide : dans le diagramme on a aussi :

$$m = E'E/B'B.$$

On en déduit les égalités suivantes :

$$B'B = \frac{E'E}{m} = \frac{\sigma_m}{1+\sigma_m} B'C.$$

ou, puisque l'on a les proportions :

$$B'B/B'C/BC = \sigma_m/1+\sigma_m/1,$$
$$B'B = \sigma_m BC. \qquad (3)$$

Donc, il suffit, dans le triangle de Potier construit comme d'ordinaire avec $CO = C_0 O_0$ et OA parallèle à O_0D, de porter le segment $B'B = \sigma_m BC$ et de lire en $A'B'$ et $B'C$ la dispersion et les contre-ampère-tours de l'induit. Du triangle ABC non corrigé on déduit les contre-tours dans le rapport $1/(1+\sigma_m)$, c'est-à-dire généralement de 10 à 20 % trop faibles; au contraire, la dispersion trouvée est beaucoup trop forte. L'erreur commise ainsi pour cette grandeur peut, pour de faibles valeurs du rapport $OB'/B'C$ (dispersion/contre-ampère-tours), atteindre facilement 100 % et plus. R. V.

***Sur les commutatrices en cascade.* — Arnold.** — *Elektrische Bahnen*, 4 juillet 1906.

Les commutatrices en cascade système Arnold, Bragstadt et La Cour, ont été décrites à propos de l'exposition faite à Liège par les Ateliers de Charleroi (1). Ces machines comprennent un moteur asynchrone accouplé à une machine à courant continu. Le stator du premier est relié au réseau; son rotor est connecté d'une part à trois bagues dont les frotteurs aboutissent à des résistances, et d'autre part à trois points équidistants de l'induit à courant continu, au moyen de trois conducteurs passant dans l'arbre creux. Si les deux machines ont le même nombre de pôles, elles ont une vitesse de rotation commune égale à la moitié de celle qui correspond au synchronisme; si les nombres de pôles des deux machines sont inégaux, la vitesse de rotation de l'ensemble est égale à celle du champ tournant multipliée par le rapport du nombre de pôles du moteur au nombre de pôles du générateur. Ces commutatrices peuvent être établies pour des vitesses de rotation beaucoup plus élevées que les commutatrices ordinaires et peuvent supporter de plus fortes charges que celles-ci. Les variations de tension du courant continu produit sont obtenues facilement par variation de l'excitation. Dans les installations à courant continu à trois fils, le point neutre du rotor est relié au conducteur neutre.

La Société Kolben et Cᵒ de Prague a établi, pour un service de traction, une commutatrice en cascade de 500 kilowatts, 2 850-3 000 volts au primaire, 550-610 volts au secondaire. Cette commutatrice fonctionne en parallèle avec plusieurs moteurs-générateurs synchrones et une batterie tampon. Les dimensions générales de cette machine sont les suivantes :

Moteur asynchrone.

	STATOR	ROTOR
Diamètre extérieur du fer. . . .	136 cm.	91,6 cm.
— intérieur —	92	56
Longueur du fer sans canaux de ventilation.	30,5	30,5
Longueur du fer avec canaux de ventilation.	85	35
Nombre de phases.	3	12
Nombre de tours par phase. . . .	126	30
Section d'un tour.	39mm²,4	37mm²,8
Nombre d'encoches par pôle et phase.	3	1
Nombre total d'encoches. . . .	54	72
Largeur des encoches. . . .	28 mm.	17 mm.
Profondeur des encoches. . .	50	58
Fente des encoches.	3	5
Genre d'enroulement.	enroulᵗ en bobines	enroulᵗ ondulé

Machine à courant continu.

Induit. — Diamètre extérieur. .	95 cm.	
Diamètre intérieur. .	49cm,5	
Longueur de fer sans canaux de ventilation.	32	
Longueur de fer avec canaux de ventilation.	35	
Nombre d'encoches.	120	
Largeur des encoches. . . .	11 mm.	
Profondeur des encoches. . .	26	
Mode de fixation des conduct.	réglettes en forme de coin.	
Nombre de conducteurs. . .	720	
Nombre de conducteurs par encoche.	6	
Section d'un conducteur. . .	2 × 15mm²	
Collecteur. — Diamètre. . . .	66cm,5	
Largeur utile.	28	
Nombre de lames.	360	
Inducteur. — Nombre de pôles.	6	
Pas polaire.	49,5	
Diamètre d'alésage.	96,8	
Diamètre du noyau.	32	
Arc polaire.	34	
Bobines inductrices.		
shunt : tours par bobine. . .	2 400	
Diamètre du fil.	2 mm.	
série : tours par bobine. . .	2	

...

(1) Voir *Éclairage Électrique*, tome XLV, 7 octobre 1905, page 16.

Une commutatrice en cascade de 500 kilowatts à 428 tours pour 50 périodes a été établie par Bruce Peebles et C°. Le moteur a 6 pôles et le générateur 8 pôles. Le moteur fonctionne sous 6000 volts au primaire : la génératrice produit 460-530 volts continus.

Cette Société a déjà construit pour plus de 20000 kilowatts de commutatrices en cascade de puissances comprises entre 400 et 500 kilowatts. Le rendement est de 91,3 % à pleine charge, de 89 % à demi-charge et de 88 % au quart de charge.

Pour la conversion du courant monophasé, Brown Boveri et C° ont établi deux petites commutatrices en cascade convertissant du courant monophasé à 2350 volts et 46,6 périodes en courant continu à 800 volts. Le moteur et le générateur sont à quatre pôles et tournent à une vitesse de rotation de 700 tours. Le démarrage est assuré par une machine à courant continu de 8 chevaux.

B. L.

TRANSMISSION & DISTRIBUTION

Nouveau type d'isolateur à haute tension.

Cet isolateur, inventé par M. Semenza, est représenté par la figure 1. La cloche supérieure, à laquelle est fixé le fil F, est protégée contre la pluie par une cloche auxiliaire plate ou « parapluie ». La cloche à laquelle est fixé le fil F

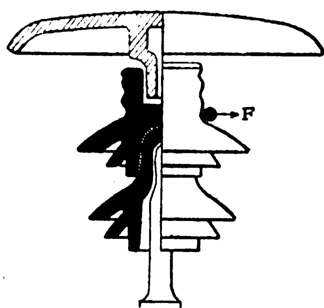


Fig. 1.

pouvant être un isolant moins coûteux que la porcelaine employée dans les isolateurs à haute tension, le prix de l'isolateur complet, avec le parapluie, ne présente pas, par rapport au prix des isolateurs actuellement employés, une augmentation de plus de 30 à 40 % pour les tensions jusqu'à 50000 volts, et de plus de 50 % pour les tensions de 80 et 90000 volts.

Les expériences comparatives faites sur ces nouveaux isolateurs et sur des isolateurs de types normaux ont donné des résultats très remarquables, que l'inventeur attribue surtout au fait que le fil n'est pas en contact avec les filets d'eau qui ruissellent. Les essais ont montré que l'isolement ne diminue pas lors des fortes pluies et que le parapluie protège parfaitement le fil et la surface efficace de la cloche contre l'effet direct de l'eau. Le modèle essayé a été percé à 111000 volts sous une pluie très abondante, et à 122000 volts à l'état de sécheresse absolue. On voit que le point de rupture quand l'isolateur est très mouillé correspond à une tension égale à 90 % de celle à laquelle l'isolateur se rompt quand il est absolument sec.

E. B.

Sur la détermination de la tension aux points de consommation sans l'emploi de fils pilotes. — G. Rasch. — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 30 août 1906.

On sait qu'il est possible, dans les lignes de transmission à courants alternatifs, de déterminer sans fils pilotes, depuis l'usine génératrice, la tension de distribution. Pour cela, on emploie deux transformateurs de mesure dont les enroulements secondaires sont en série avec un voltmètre dans un circuit. Sur l'enroulement primaire d'un des transformateurs agit la tension aux barres du tableau ; sur l'autre agit une grandeur proportionnelle à l'intensité de courant et à l'impédance de la ligne de transmission et en phase avec le courant. Les indications du voltmètre relié aux enroulements à basse tension des transformateurs sont proportionnelles à la tension existant aux points de distribution.

L'auteur montre comment on peut, sur les réseaux à courant continu, employer une méthode analogue sans fils pilotes.

Soient $2W$ la résistance de conducteur d'aller et retour d'une ligne de transmission à deux fils, J l'intensité, E la tension au départ, V la tension à l'arrivée : on a

$$V = E - 2Jw. \qquad (1)$$

On intercale à l'usine génératrice dans l'un des deux conducteurs une faible résistance w, inférieure au vingtième de la résistance de la ligne de transmission. Entre les deux conduc-

teurs, on branche deux résistances en série a et b de valeur élevée, et on place un voltmètre de résistance r en dérivation entre le point commun des résistances a et b et l'extrémité de la résistance w.

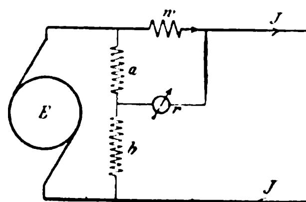


Fig. 1.

La tension v agissant sur le voltmètre est donnée, comme on peut le voir facilement, par l'expression suivante :

$$v = r\frac{aE - (a+b)\,wJ}{ab + (a+b)\,r} \qquad (2)$$

Pour que la valeur de v soit proportionnelle à chaque instant à celle de V, il faut déterminer a, b et w de façon que l'on ait :

$$\frac{(a+b)\,w}{a} = 2W. \qquad (3)$$

Si, par exemple, on a $w/W = 0{,}08$, on a $b = 24\,a$, et v a la valeur

$$v = \frac{V}{\frac{24a}{r} + 25}$$

Si l'on prend a de l'ordre de grandeur de la résistance du voltmètre r, on lit sur le voltmètre le cinquantième environ de la tension à l'extrémité : il suffit donc d'employer un voltmètre convenable dont la graduation est modifiée dans ces conditions.

Quand, dans une installation à trois fils, on veut mesurer la tension à l'extrémité de la ligne entre deux conducteurs extérieurs, on peut employer le montage de la figure 2. La tension à l'extrémité est donnée par l'expression

$$V = E_1 + E_2 - (J_1 + J_2)\,W. \qquad (4)$$

Il faut donc que les courants dans les deux conducteurs extérieurs influent sur les indications de l'appareil de mesure : on est donc conduit à placer en série deux résistances w. Le croisement des résistances a et b reliées au conducteur négatif est nécessaire pour que l'influence exercée par le courant J_2 soit de même sens que celle de J_1.

La tension lue sur l'appareil répond à l'équation :

$$v = r\frac{(E_1 + E_2)(a-b) - wa\,(J_1 + J_2)}{2ab + (a+b)\,a}. \qquad (5)$$

Elle est donc proportionnelle à la tension de l'extrémité de la ligne lorsque l'on a l'égalité :

$$w\frac{a}{a-b} = W. \qquad (6)$$

L'équation (5) devient alors la suivante :

$$v = \frac{V}{\frac{2ab}{r(a-b)} + \frac{a+b}{a-b}}. \qquad (7)$$

Si l'on prend $w/W = 0{,}04$ environ et a de l'ordre de grandeur de r, on mesure à peu près le centième de la tension de distribution.

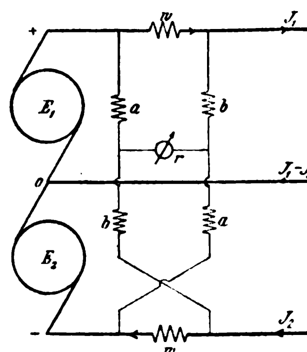


Fig. 2.

La méthode est un peu moins facile à appliquer pour la mesure des tensions de chacun des deux ponts dans les réseaux à trois conducteurs. Il faut doubler le montage précédent. Soient E_1 et E_2 la tension des deux ponts. A l'origine, V_1 et V_2 les tensions à l'extrémité de la ligne de transmission, J_1 et J_2 les intensités de courant dans les deux conducteurs extérieurs, W et W_0 les résistances des conducteurs extérieurs et du conducteur neutre. On a :

$$V_1 = E_1 + J_2W_0 - J_1(W + W_0) \qquad (8)$$

$$V_2 = E_2 + J_1W_0 - J_2(W + W_0). \qquad (9)$$

Si donc deux voltmètres placés à l'usine génératrice doivent donner des indications proportionnelles aux tensions à l'extrémité de la ligne, ils doivent d'abord être connectés de façon que le voltmètre de chaque pont ne soit pas influencé

1° par la tension des autres barres ;

2° par la tension des barres correspondantes et l'intensité des autres conducteurs dans le sens positif ;

3° par l'intensité correspondante dans le sens négatif.

Le dispositif représenté par la figure 3 satisfait à ces conditions. Il n'y a pas d'influence mutuelle entre les appareils de mesure des deux ponts. Il faudrait pour cela que la différence de potentiel entre les extrémités de la résistance w_0,

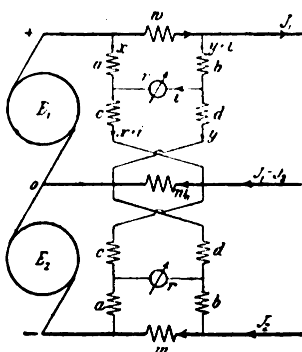


Fig. 3.

c'est-à-dire $w_0(J_1 - J_2)$ dépendît des courants venant de c et d où y allant, ce qui n'est pas le cas en pratique. Pour le calcul de la tension v_1 lue au voltmètre, on peut donc opérer comme si l'autre pont n'existait pas, et inversement.

En employant les notations qu'indique le schéma de la figure 3, on obtient les équations suivantes :

$$\left.\begin{aligned} ci + (a+c)x &= E_1 + w_0J_2 - w_0J_1 \\ (b+r)i - ax + by &= -wJ_1 \\ (c+r)i + cx - dy &= w_0J_2 - w_0J_1 \end{aligned}\right\} \quad (10)$$

Parmi les trois faibles courants i, x et y, le premier seul est intéressant parce que l'on a $v_1 = ir$. On trouve :

$$\Delta \cdot i = \Delta \frac{v_1}{r} = E_1(ad - bc) + w_0 J_2 a(b+d) - J_1\{w_1 a(b+d) + wd(a+c)\}. \quad (11)$$

Δ, déterminant du système d'équation (10), peut provisoirement être considéré comme facteur constant.

Pour que la tension v_1 au voltmètre soit à chaque instant proportionnelle à la tension de distribution V_1, on doit avoir les deux équations de conditions :

$$w_0 \frac{a(b+d)}{ad - bc} = W_0 \quad (12)$$

et
$$\frac{w_0 a(b+d)}{ad - bc} + \frac{wd(a+c)}{(ad - bc)} = W + W_0 \quad (13)$$

Les équations (12) et (13) montrent que l'on doit avoir :

$$\frac{wd(a+c)}{ad - bc} = W. \quad (14)$$

Cette équation permet, avec l'équation (12), la détermination de $a\ b\ c$ et d. Si, par exemple, on prend $b/d = 0{,}6$ et $a/c = 1{,}5$, on trouve, d'après les équations 12 et 14 :

$$w_0/W_0 = 0{,}0625 \text{ et } w/W = 0{,}04.$$

Le rendement de la transmission n'est modifié que d'une façon insensible par la présence des résistances w_0 et w.

Si l'on tient compte des équations (12) et (13), l'équation (11) se transforme en la suivante :

$$\frac{v_1}{V_1} - \frac{(ad - bc)r}{\Delta}. \quad (15)$$

On calcule Δ au moyen de l'équation (10) :

$$\Delta = r(a+c)(b+d) + ac(b+d) + bd(a+c).$$

En introduisant les valeurs de b/a et de c/a dans l'équation (15), on obtient la valeur :

$$\frac{v_1}{V_1} = \frac{1}{40 + 16\frac{e}{r} + 25\frac{b}{r}}.$$

Si l'on choisit c et b de l'ordre de grandeur de la résistance du voltmètre, l'appareil indique environ le quatre-vingtième de la tension à l'arrivée.

On peut simplifier considérablement les montages indiqués en employant des voltmètres différentiels au lieu de voltmètres ordinaires.

B. L.

Expériences sur l'échauffement des câbles. —*Elektrotechnische Zeitschrift*, 30 août 1906.

Ces expériences ont été faites avec des courants triphasés par la Société Land-und Seekabelwerke et ont donné un certain nombre de résultats intéressants. Les câbles étudiés étaient enterrés de 50 centimètres environ dans le sol et aussi éloignés que possible les uns des autres. Les expériences portèrent sur les types de câbles suivants :

3×	10 mm² pour	700 volts ;	enveloppe de plomb nue.
3×	10 — pour	50 000 —	armé.
3×	25 — pour	10 000 —	asphalté.
3×	35 — pour	700 —	enveloppe de plomb nue.
3×	150 — pour	700 —	armé.

Les câbles étaient reliés d'une part à un alternateur triphasé produisant des courants de fréquence 50, et étaient court-circuités à l'autre

extrémité. L'excitation de l'alternateur était portée à la valeur convenable pour que l'intensité de courant désirée fut obtenue.

L'élévation de température était déterminée par le calcul d'après l'augmentation de résistance du cuivre constituant les conducteurs. Pour la mesure de cette résistance, on déconnectait deux conducteurs du câble et on les reliait à un pont de Thomson, après quoi on établissait les jonctions précédentes. Les résultats obtenus sont résumés par les tableaux suivants :

MINUTES	OHMS	ACCROISSEMENT Δ	ACCROISSEMENT EN °/o	ACCROISSEMENT DE TEMPÉRATURE en C.
TABLEAU I — 3 × 10 qmm pour basse tension $15^m,5$ 60 Amp.				
0	0,0527	»	»	»
5	0,0551	0,0024	4,5	11,25
10	0,0562	0,0035	6,6	16,50
15	$0{,}0562_5$	$0{,}0035_5$	6,7	16,75
20	0,0567	0,0040	7,6	19,00
25	0,0570	0,0043	8,1	20,25
30	0,0575	0,0048	9,1	22,75
35	0,0578	0,0051	9,7	24,25
40	0,0578	0,0051	9,7	24,25
45	0,0578	0,0051	9,7	24,25
TABLEAU II — Même câble avec 80 Amp.				
0	0,0511	»	»	»
5	0,0552	0,0041	8,0	20,00
10	0,0566	0,0055	10,8	27,00
20	0,0578	0,0067	13,2	33,00
30	»	»	»	»
40	0,0584	0,0073	14,3	35,75
50	»	»	»	»
70	0,0588	0,0077	15,0	37,50
85	0,0596	0,0085	16,6	41,50
TABLEAU III — 3 × 10 qmm pour 50 000 Volts $15^m,5$ 60 Amp.				
0	0,0519	»	»	»
5	0,0532	0,0013	2,5	6,25
10	0,0539	0,0020	3,9	9,75
15	0,0541	0,0022	4,2	10,50
20	0,0543	0,0024	4,6	11,50
25	0,0048	0,0029	5,6	14,00
30	0,0551	0,0032	6,1	15,25
60	0,0569	0,0050	9,6	24,00
120	0,0579	0,0060	11,5	28,75
180	0,0582	0,0063	12,1	30,25
220	0,0585	0,0066	12,6	31,50

MINUTES	OHMS	ACCROISSEMENT Δ	ACCROISSEMENT EN °/o	ACCROISSEMENT DE TEMPÉRATURE en C.
TABLEAU IV — Même câble avec 80 Amp.				
0	0,0502	»	»	»
5	0,0523	0,0021	4,2	10,50
15	0,0536	0,0034	6,8	17,00
25	0,0550	0,0048	9,6	24,00
35	0,0561	0,0059	11,8	29,50
45	0,0562	0,0060	12,0	30,00
TABLEAU V — 3 × 25 qmm pour 10 000 Volts 42 m. 50 Amp.				
0	0,0566	»	»	»
5	0,0571	0,0005	0,9	2,25
10	0,0573	0,0007	1,2	3,00
15	0,0574	0,0008	1,4	3,50
30	0,0583	0,0017	3,0	7,50
45	0,0583	0,0017	3,0	7,50
50	0,0585	0,0019	3,4	8,50
60	0,0586	0,0020	3,5	8,75

MINUTES	OHMS	ACCROISSEMEMT EN °/o	ACCROISSEMENT DE TEMPÉRATURE en C.
TABLEAU VI — Même câble avec 100 Amp.			
0	0,0578	»	»
5	0,0589	2,0	5,00
10	0,0590	2,1	5,25
15	0,0599	3,6	9,00
20	0,0604	4,5	11,25
25	0,0605	4,6	11,50
30	0,0610	5,5	13,75
35	0,0614	6,3	15,75
40	0,0615	6,5	16,25
45	0,0616	6,6	16,50
55	0,0617	6,8	17,00
60	0,0618	7,0	17,50
TABLEAU VII — Même câble avec 150 Amp.			
0	0,0548	»	»
5	0,0568	3,6	9,00
20	0,0582	6,2	15,50
25	0,0596	8,8	22,00
35	0,0606	10,6	26,50
45	0,0611	11,5	28,75
55	0,0616	12,5	31,25
65	0,0620	13,2	33,00
75	0,0622	13,5	33,75

MINUTES	OHMS	ACCROISSEMENT EN °/o	ACCROISSEMENT DE TEMPÉRATURE en C.
	TABLEAU VIII 3 × 35 qmm pour basse tension 27 m. 70 Amp.		
0	0,0264	»	»
5	0,0268	1,5	3,50
10	0,0271	2,6	6,50
15	0,0271	2,6	6,50
20	0,0271	2,6	6,50
35	0,0271	2,6	6,50
	TABLEAU IX Même câble avec 105 Amp.		
0	0,0286	»	»
5	0,0277	3,4	8,50
10	0,0280	4,5	11,25
15	0,0282	5,2	13,00
20	0,0282	5,2	13,00
25	0,0282	5,2	13,00
	TABLEAU X Même câble avec 140 Amp.		
0	0,0234	»	»
5	0,0242	3,5	8,75
10	0,0247	5,6	14,00
20	0,0252	7,7	19,25
30	0,0255	9,0	22,50
40	0,0257	9,9	24,75
50	0,02575	10,0	25,00
	TABLEAU XI 3 × 150 qmm pour basse tension 22 m. 300 Amp.		
0	0,00524	»	»
5	0,00534	1,9	4,75
10	0,00536	2,3	5,75
20	0,00538	2,7	6,75
30	0,00541	3,3	8,25
45	0,00548	4,6	11,50
60	0,00550	5,0	12,50
	TABLEAU XII Même câble avec 600 Amp.		
0	0,00502	»	»
5	0,00534	6,4	16,00
10	0,00552	10,0	25,00
15	0,00568	13,2	33,00
25	0,00594	18,4	46,00
35	0,00614	22,4	56,00
45	0,00629	25,4	63,50
55	0,00634	26,3	66,75
65	0,00642	28,0	70,00
75	0,00654	30,3	75,75

MINUTES	OHMS	ACCROISSEMENT EN °/o	ACCROISSEMENT DE TEMPÉRATURE en C.
	TABLEAU XIII Même câble avec 450 Amp.		
0	0,00502	»	»
5	0,00512	1,9	4,75
10	0,00517	2,9	7,25
15	0,0,523	4,1	10,25
25	0,00542	8,0	20,00
35	0,00552	9,9	24,75
45	0,00560	11,5	28,75
55	0,00568	13,1	32,75
65	0,00574	14,2	35,50
75	0,00578	15,0	37,50
85	0,00581	15,6	39,00
95	0,00585	16,4	41,00
105	0,00588	17,0	42,50
120	0,00591	17,6	44,00
130	0,00594	18,1	45,25

ÉCLAIRAGE

***Comparaison entre les prix de revient de l'éclairage électrique avec l'emploi des nouvelles lampes à incandescence.* — Teichmüller.** — *Annalen der Elektrotechnik*, août 1906.

L'auteur étudie comparativement les prix de revient auxquels conduit l'éclairage électrique au moyen des nouvelles lampes à incandescence à filaments métalliques (tantale, osmium, zirconium, tungstène). Pour cela, il tient compte du prix d'achat des lampes, de leur durée de fonctionnement, et de l'énergie électrique absorbée : les calculs sont faits par la méthode graphique au moyen de courbes. Le prix de revient d'une bougie Hefner pendant une heure est calculé en fonction du prix de l'énergie électrique. Le résultat principal à retenir, c'est que, dans tous les cas de la pratique, les prix auxquels conduit l'emploi de lampes au carbone sont plus élevés que ceux obtenus pour les autres lampes.

Les résultats obtenus d'après les courbes peuvent être résumés par le tableau suivant, dont les chiffres indiquent le prix de l'énergie, en centimes par kilowatt-heure, pour lequel le prix de revient avec la lampe indiquée serait égal au prix de revient auquel conduit la lampe indiquée en tête de la colonne.

CARBONE (PRIX D'ACHAT 62fr,5.)	CARBURE DE ZIRCONIUM (94 cent.)	TANTALE (3fr,10.)	OSMIUM (5 francs.)
Carbure de zirconium. . 12	Zirconium. . 6,5	Zirconium. 17,8	Zirconium. 24
Zirconium. . 8,4	Osmium. < 0	Osmium. . 6,25	Tungstène. 0,0
Osmium. . 3,9	Tantale. . < 0	Tungstène. 1,25	
Tantale. . 3,5			
Tungstène (1) 2,5			

(1) Le prix d'achat de la lampe au tungstène Kuzel a été évalué à 2fr,50.

L'auteur étudie aussi comment varient les courbes lorsqu'une des grandeurs qui influent sur le prix total varie (consommation, prix d'achat, durée d'utilisation, intensité lumineuse, etc.). D'après les résultats obtenus, qui montrent que la lampe au carbure est la plus coûteuse, on voit qu'il ne faut pas se laisser arrêter par le prix d'acquisition élevé des nouvelles lampes.

E. B.

***Sur les lampes à filament métallisé.* — F. Willcox.** — *Elektrotechnik und Maschinenbau*, 2 septembre 1906.

La General Electric C° fabrique des lampes G. E. M. à filament de carbone métallisé (1) consommant 2,5 watts par bougie, soit 40 watts pour la lampe de 16 bougies.

L'auteur étudie l'influence de l'emploi de ces lampes et d'autres lampes à faible consommation sur l'exploitation des usines génératrices. Les chiffres principaux relatifs à ces sources lumineuses sont indiqués par le tableau suivant :

	LAMPE GEM 16 BOUGIES 40 WATTS (2,5 watts par bougie)	LAMPE ORDINAIRE AU CARBONE 50 watts 16 bougies (3,1 watts par bougie).	LAMPE GEM 50 WATTS 20 BOUGIES (2,5 watts par bougie).	LAMPE GEM 45 WATTS 16 BOUGIES (2,8 watts par bougie).	LAMPE ORDINAIRE AU CARBONE 56 watts 16 bougies.	LAMPE AU TANTALE 25 BOUGIES (2 watts par bougie).
Durée d'utilisation pratique en heures.	500	500	500	1 000	1 000	800
Prix d'achat de la lampe en francs.	1	0,8	1	1	0,8	3
Watts par lampe.	40	50	50	45	56	50
Lampes-heure par kilowatt-heure.	25	20	20	22,2	17,84	20
Bougies par kilowatt-heure.	400	320	400	355,5	285,4	500
Prix du travail pour 1 000 bougies-heure en fr. (à 50 c. le kw.-h).	1,25	1,55	1,25	1,40	1,75	1,0
Prix de renouvellement par kilowatt-heure en centimes.	5	3,2	4	2,2	1,5	7,5
— par lampe-heure en centimes.	0,20	0,16	0,2	0,8	0,1	0,375
— par 1 000 bougies-heure en centimes.	12,5	10	10	6,25	5,0	15,0
Recettes de l'usine génératrice par lampe en 1 000 heures à 50 cent. le kw.-h., en francs.	20	25	25	22,5	28	25
Recettes de l'usine génératrice en 1 000 heures à 2fr,5 par lampe-heure, en francs.	25	25	25	25	25	25
Recettes de l'usine génératrice en 1 000 heures pour 1fr,56 par 1 000 bougies-heure, en francs.	25	25	31,2	25	25	39

E. B.

ÉLÉMENTS PRIMAIRES ET ACCUMULATEURS

Brevets récents concernant les accumulateurs au plomb. — *Centralblatt für Accumulatoren*, juin, juillet et août 1906.

Accumulateur. — W.-H. PALMER. — Brevet américain 817 132 du 14 février 1906, acc. 3. 4. 06.

L'élément est construit de façon que le bac soit à peine plus long que les plaques et que celles-ci ne puissent que très difficilement être mises en court-circuit. Les plaques positives s'appuient, par des queues, sur un pont placé à l'extrémité du bac ; les plaques négatives reposent, par d'autres queues, sur une traverse placée à l'autre extrémité. On peut disposer des séparateurs entre les plaques, mais cela n'est pas indispensable. Les plaques négatives sont un peu plus profondes que les positives. Les bords

(1) Pour la fabrication de ces filaments, voir *Éclairage Electrique*, 19 août 1905, page 277.

latéraux des plaques de même polarité sont sur une ligne, et les plaques de polarité contraire sont décalées par rapport aux précédentes, de façon qu'un espace suffisant soit ménagé pour la matière active qui tombe des plaques. Des cales en matière élastique sont interposées entre le récipient et les traverses supportant les plaques.

Perfectionnements aux accumulateurs. — Akkumulatorenfabrik Aktiengeselschaft. — Brevet anglais 8 352, 6 avril 1906, acc. 3. 5. 06.

Pour maintenir écartées les unes des autres les plaques d'accumulateurs ou éviter le durcissement des négatives, on a employé des planchettes en bois mince intercalées entre les plaques. Les fissures et les trous du bois sont promptement remplis de particules de sulfate de plomb qui se transforment en plomb spongieux ou en peroxyde et donnent lieu à des court-circuits. Si l'on emploie comme séparateur deux planchettes minces superposées, les fissures et les trous de celles-ci se recouvrent généralement, et l'inconvénient signalé est évité.

Accumulateur. — J.-R. Macmillan. — Brevet américain 817 498, 1er avril 1905, acc. 10. 4. 06.

La grille est prévue pour que la plaque présente une grande surface active sous un faible poids. Elle consiste en un cadre rectangulaire avec queue de connexion, et avec côtes horizontales et transversales faisant entre elles un angle de 45°. Celles-ci ont des dents courtes et dirigées horizontalement. Les côtes et les dents ont une section trapézoïdale aplatie diagonalement et leurs surfaces forment des coins entre lesquels la matière active est emprisonnée et maintenue. Chaque électrode comprend plusieurs grilles juxtaposées, ce qui assure une longue fixation de la matière active et une grande solidité à l'ensemble de la plaque. On emploie généralement quatre grilles doubles pour les électrodes positives et cinq grilles simples pour les négatives.

Matrice pour la fabrication de plaques Planté. — A.-I. Blanchon. — Brevet français 360 473, 24 février 1905, publié 24 février 1906.

Dans ce moule, on travaille le plomb à l'état mou, c'est-à-dire au voisinage de son point de fusion. La matrice consiste en un bloc rectangulaire en fonte ou en acier dans le milieu duquel est un creux rectangulaire ayant les dimensions de la plaque à préparer. Ce creux est entièrement rempli de bandes rectangulaires d'acier de différentes hauteurs. La moitié gauche de chaque partie de la matrice est munie de ces bandes, tandis que l'autre moitié est vide. Après que le plomb mi-fluide a pénétré dans tous les espaces vides de la matrice sous l'effet de la compression, on refroidit légèrement l'appareil, et l'on sort la plaque.

Perfectionnements aux plaques d'accumulateurs. — A. Schauschieff. — Brevet anglais 11 654, 3 juin 1905, acc. 24. 5. 06.

Une plaque Planté, dans laquelle on veut éviter les craquelures et les chutes de matière, porte sur ses deux surfaces un grand nombre de petites côtes minces formant entre elles des rainures. La plaque est divisée en quatre parties, dans lesquelles les côtes sont parallèles à la diagonale. Les côtes de chaque partie forment, sur une face, un angle droit avec les côtes de l'autre face. On obtient ainsi une plaque extrêmement résistante et solide.

Accumulateur. — O.-A. Garreau. — Brevet français 360 150 du 6 décembre 1905, acc. 14. 2. 06.

Un cadre en plomb antimonieux est partagé en deux ou plusieurs rectangles dans lesquels un grand nombre de bandes de plomb sont disposées horizontalement. Ces bandes ont une partie épaisse et une partie amincie. Elles sont soudées, par soudure autogène, aux côtés verticaux du cadre. L'amincissement des bandes permet d'obtenir entre elles l'espace nécessaire pour le foisonnement de la matière active. L'extension des barres longitudinales peut se produire dans un espace libre ménagé entre leurs extrémités extérieures. Le tout est maintenu par des barrettes à l'intérieur desquelles on peut disposer des feuilles d'ébonite perforées.

Perfectionnements aux éléments secondaires pour la traction. W.-N. Caton. — Brevet anglais 19 853, 2 octobre 1905, acc. 24. 5. 06.

Pour empêcher la chute de la matière active produite par les vibrations et, par suite, la détérioration de l'élément, les grilles portent à leur extrémité supérieure des baguettes transversales en ébonite, en verre ou autre matière, au moyen desquelles elles sont suspendues à des bracelets en caoutchouc qui, d'autre part, sont supportés par des baguettes semblables supportées par le bac de l'élément. Des feuilles d'ébonite perforées servent à séparer les plaques les unes des autres, et à les maintenir en place en évitant les court-circuits.

Plaque d'accumulateur. — O.-H. Fay. — Brevet américain 820 040 du 19 août 1905, acc. 8. 5. 06.

Dans une plaque Faure, les craquelures et la chute de la matière active doivent être évitées. La grille, entourée de bords solides, consiste en une série de bandes longitudinales rectangulaires. De chaque côté de la grille sont ménagées de larges bandes diagonales munies de perforations. Ces bandes forment, avec la face opposée de la plaque, des pochettes que l'on remplit de matière active. Les perforations remplissent le double but de permettre l'introduction de la matière active et de laisser libre la circulation de l'électrolyte : elles ont une forme conique.

Perfectionnements aux accumulateurs. — E.-V. Stebbins. — Brevet anglais 26 876 du 29 décembre 1905, acc. 31. 5. 06.

L'invention se rapporte à un procédé pour adjoindre à la matière active une matière neutre inattaquable finement divisée, afin de rendre celle-ci plus poreuse. Pour cela, l'inventeur emploie un sulfate de baryum précipité d'une solution froide d'un sel de baryum solide. On mélange à l'oxyde de plomb environ 50 $^0/_0$ de ce sel.

Accumulateur avec électrodes cylindriques creuses placées les unes dans les autres. — L.-A. Génard. — Brevet allemand du 17 décembre 1902, acc. 7. 7. 06.

L'électrode positive de l'accumulateur consiste en un vase poreux cylindrique placé dans un récipient en plomb ou autre corps non oxydable. Entre les deux est tassée la matière positive active, le récipient extérieur peut être entouré d'une enveloppe mince isolante en caoutchouc, ébonite, celluloïd, gutta-percha ou autre. L'électrode positive entoure l'électrode négative et l'électrolyte. A la partie supérieure est placé un couvercle à bords recourbés en matière isolante : au milieu de ce couvercle est un bouchon de remplissage. La borne positive de l'accumulateur est formée par une bande métallique soudée au récipient.

L'électrode négative consiste en un tube cylindrique en plomb introduit dans un vase poreux : entre ce cylindre de plomb et le vase est tassée la matière active négative subdivisée dans toute sa hauteur par des bagues inclinées en matière isolante. La forme inclinée de ces bagues détermine un serrage de la matière active contre le cylindre de plomb lors des secousses, et permet d'avoir toujours un bon contact. L'électrolyte remplit l'espace libre de l'accumulateur. Dans la paroi des électrodes sont ménagées de larges ouvertures qui permettent la circulation de l'électrolyte.

Électrode d'accumulateur, particulièrement pour les éléments de poche. — F. Schaeffer. — Brevet allemand 173 345 du 28 février 1904, acc. 9. 7. 06.

Les électrodes sont formées par un bloc prismatique de section triangulaire ou trapézoïdale entouré d'une grille.

Ce mode de construction de l'électrode présente des avantages importants, et permet d'obtenir une capacité élevée pour un faible poids et une durée de fonctionnement considérable : en outre, les remplacements sont faciles. Les électrodes sont établies de telle façon que les surfaces libres d'un bloc positif et d'un bloc négatif soient placées l'une en face de l'autre. Les électrodes supportent un courant de charge d'intensité relativement élevée, ce qui permet une charge rapide. Par exemple une batterie de poche de 180 grammes de poids total a une capacité de 1,25 ampère-heure et peut être chargée en 4 heures par un courant de 0,5 ampère. Un élément peut subir un grand nombre de charges et décharges avant d'être hors de service. La batterie ainsi établie conserve la charge longtemps. La façon dont la grille entoure le bloc central assure aux électrodes une solidité considérable entre les trépidations et les ébranlements ou les chocs, ce qui est important pour les accumulateurs de poche. La solidité de l'électrode est augmentée par le fait que le foisonnement de la matière active produit une compression sur les côtés de la grille.

Procédé pour fabriquer des électrodes au moyen de bandes de plomb. — F. Gondrand et H. Célestre. — Brevet allemand 173 614, 16 avril 1903, acc. 13. 7. 06.

Les électrodes sont formées de bandes de plomb que l'on replie en accordéon sur elles-mêmes et que l'on comprime légèrement de façon à obtenir une section en zigzag : entre les faces successives juxtaposées de la bande repliée, se forme la matière active qui présente une grande solidité contre les trépidations et ne touche que très difficilement. Lors du foisonnement ou de la contraction de la matière active, les ondulations de la bande se rapprochent ou s'écartent et la plaque ne présente pas de gondolements. On obtient ainsi une grande capacité et un faible poids

Plaque d'accumulateur. — F.-T. KELLEY. — Brevet anglais du 13 juin 1905, acc. 13. 6. 06.

L'électrode positive consiste en minium avec environ 20 % de poudre de plomb ou de déchets de plomb, auxquels on ajoute une quantité suffisante d'acide sulfurique (1 partie pour 2 parties de mélange) afin de former une pâte. Ce mélange est placé dans un récipient poreux et muni de bandes métalliques. Pour accélérer la charge des plaques, on les place d'abord pendant 30 minutes environ dans une forte solution de chlorure de chaux. Pour préparer l'électrode négative, on dissout de l'acétate de plomb dans l'eau et on dissout dans cette solution le plus de zinc possible. Le dépôt qui se forme dans la solution est mélangé avec 20 % de plomb finement divisé ou de déchets de plomb. Ce mélange est placé dans un vase poreux comme pour l'électrode positive. Au lieu du dépôt obtenu dans l'acétate de plomb, on peut employer de la litharge. Les plaques sont placées dans de l'acide de densité 1,200 environ.

Plaque d'accumulateur. — W.-L. SILVEY. — Brevet américain 824 828, 5 mars 1906, acc. 3. 7. 06.

Le support est formé par une grille dont les barreaux transversaux ont une section triangulaire avec sommet dirigé vers l'intérieur, de façon à former des ouvertures en forme de coins. Les pochettes sont remplies de matière active à l'état sec, puis deux grilles sont accouplées ensemble par des rivets. Des trous permettent une libre circulation de l'électrolyte et un facile dégagement des gaz. Le foisonnement de la matière active a pour effet de presser les pastilles contre les barreaux des grilles et de produire un bon contact entre la matière active et son support.

E. B.

MESURES

Sur la mesure directe du temps et quelques applications pratiques (fin). — H.-C. Steidle. — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 16 août 1906.

Après ces essais préliminaires, l'auteur a mesuré la durée de fonctionnement de différents relais. La figure 3 indique le montage adopté. L'un des contacts de l'appareil à chute rompt la jonction entre la source de courant et le condensateur ainsi que la résistance de décharge ; l'autre contact rompt le circuit du relais (pour les relais à courant de repos), ou rompt l'une des branches d'un pont contenant le relais (pour les relais de travail). L'auteur s'est proposé de déterminer le temps qui s'écoule jusqu'au moment de l'ouverture et de la fermeture du circuit de la ligne.

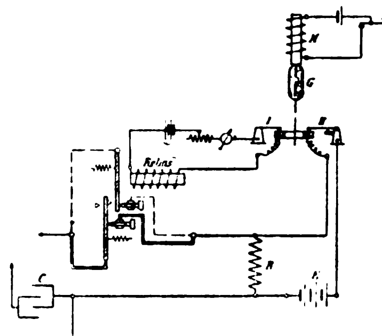


Fig. 3.

L'appareil étudié fut d'abord un relais polarisé de Siemens et Halske. Les résultats de mesure sont indiqués par le tableau II.

TABLEAU II

NUMÉRO	α_2	α_1		Δ	Δ^2
1.	177	161		+ 5	25
2.	177	158	1. Condensateur	+ 2	4
3.	177	156	(mica).	»	»
4.	177	152		— 4	16
5.	177	158	$C = 10^{-6}$ Farad	+ 2	4
6.	177	157		+ 1	1
7	177	152	2. Résistance.	— 4	16
8.	177	158		+ 2	4
9.	177	150	W = 2 000 Ohms	— 6	36
10.	177	158		+ 2	4
MOYENNE.	177	156		$\Sigma \Delta^2$ 110	

L'intervalle de temps calculé qui s'écoule entre la disparition du courant de ligne et le début du mouvement de l'armature est de $2,1 . 10^{-4}$ seconde. Un autre relais, de provenance différente, a présenté un intervalle de temps de $6,9 . 10^{-4}$ seconde, soit trois fois plus environ. Un Morse a présenté une durée de fonctionnement de $1,5 . 10^{-2}$ seconde. Plusieurs autres exemples développés par l'auteur montrent l'application de la méthode.

Détermination des coefficients de self-induction et des résistances de pertes des différents circuits. L'auteur a déterminé, par la mesure directe du

temps, les coefficients de self-induction de différents circuits employés en télégraphie et a comparé les chiffres ainsi trouvés avec les résultats obtenus par d'autres méthodes de mesure, et en particulier par la méthode du pont, fréquemment employé actuellement. Pour déterminer, par la mesure du temps, le coefficient de self-induction d'un circuit, il suffit d'appliquer la méthode correspondant à la figure 2, en intercalant dans le circuit oscillant le circuit dont on veut mesurer le coefficient de self-induction, au lieu d'y placer un étalon de self-induction. On a alors

$$L = \frac{\tau^2}{C.4\pi^2}\left(1 - \frac{C(R+r)^2}{4L}\right) \qquad (9)$$

En éliminant $(R+r)$ de l'équation générale de τ et en supposant que $C(R+r)^2/4L$ est petit vis-à-vis de l'unité, on obtient la formule

$$L = \frac{\tau^2}{(4\pi^2\psi + {}^2\tau^2)C} \qquad (10)$$

dans laquelle on a posé, pour abréger :

$$\psi^2 = \left[\frac{\log\left(\frac{x_0}{\alpha}\right)}{\tau}\right].$$

On a la relation suivante :

$$R + r = \frac{2L\log\left(\frac{x_0}{x_\tau}\right)}{\tau} \qquad (11)$$

Comme exemple de la détermination du coefficient de self-induction, l'auteur cite celui d'un petit transformateur téléphonique avec noyau en tôles découpées et circuit magnétique entièrement fermé. Le condensateur employé avait une capacité de un microfarad. La valeur de τ était 0,00868 seconde. Le rapport des déviations x_0/x_τ aux temps 0 et τ avait pour valeur 1,45 en moyenne.

On en déduit pour ψ la valeur 42,4 et pour L la valeur 1,95 henry, d'après la formule donnée ci-dessous. Comme résistance de frottement totale dans le circuit, on trouve :

$$R + r = \frac{2L\log(x_0/x_\tau)}{\tau} = 2L\Phi = 165 \text{ ohms}.$$

La résistance à courant continu du circuit étant de 20 ohms, il y a une résistance de pertes de 145 ohms pour le passage de l'oscillation propre produite. Différents autres coefficients de self-induction furent mesurés, ainsi que la résistance de pertes. Le tableau III indique les résultats obtenus avec la méthode de mesure du temps, et, à côté, les résultats obtenus par d'autres méthodes (méthode du pont): $H\gamma$ désigne le coefficient de self-induction et V la résistance de pertes.

TABLEAU III

APPAREIL	MESURÉ D'APRÈS :			
	MESURE du temps.		PONT	
	Hγ	V	Hγ	V
Transformateur (primaire). . .	1,9	145	1,73	250
Sonnerie à noyau plein. . . .	2,1	1 500	1,9	2 00:
Sonnerie à noyau feuilleté. . .	0,56	116	0,50	153

E. B.

Sur la mesure des faibles courants de grande fréquence. — B. Gati. — *Electrical World.*

Le thermo-galvanomètre de Duddell, servant à la mesure des courants de grande fréquence à faible intensité, a été déjà décrit (1) : pour une résistance de chauffage de 13 910 ohms, un courant de 31 microampères produit une déviation de 250 millimètres sur l'échelle placée à un mètre; avec une résistance de chauffage de 18 ohms, il faut 800 microampères pour produire la même déviation. Une résistance de chauffage de valeur élevée peut avantageusement être employée pour les mesures de tension. Ainsi on peut mesurer la différence de potentiel à l'extrémité ou à l'origine d'une ligne téléphonique en mesurant le courant à travers une résistance placée en dérivation. En appelant I_2 le courant en microampères et R la résistance, la différence de potentiel est $E_2 = RI_2$. Pour $E_2 = 0,1$ volt et $R = 10000$ ohms, I_2 doit avoir pour valeur 10 microampères, valeur facilement mesurable.

On peut obtenir des résultats analogues en chauffant, au moyen d'une résistance de chauffage analogue à celle de Duddell, une série de thermo-éléments de Rubens et en mesurant le courant de ces couples thermo-électriques au moyen d'un galvanomètre sensible. La sensibilité de ce dispositif est inférieure à celle de l'appareil de Duddell.

(1) Voir *Éclairage Électrique*, tome XLVII, 19 mai 1906, p. 278.

On peut obtenir de meilleurs résultats en utilisant un bolomètre de Fessenden dont Kennely a décrit récemment l'emploi pour la mesure des courants téléphoniques. Cet auteur place un condensateur entre la ligne de transmission et le bolomètre, et mesure l'intensité de courant à l'extrémité de la ligne. Il détermine, d'après cette intensité de courant et d'après la f. é. m. mesurée à l'origine de la ligne l'impédance de l'extrémité réceptrice, et, d'après cette impédance, il détermine l'état de la ligne téléphonique. Ce système peut être employé avec succès, mais, l'intensité du courant téléphonique variant le long de la ligne et la forme de l'onde de courant variant avec la fréquence employée, il faut faire la mesure à l'origine et à l'extrémité de la ligne. L'auteur indique que l'on peut déceler facilement un courant de un microampère, et même un courant de 0,65 microampère. Le bolomètre est formé d'un fil de platine très fin. On fabrique un fil de platine ayant un diamètre de 20 microns, puis on le recouvre d'argent ou d'un autre métal soluble, et on le tréfile à nouveau. Actuellement, on est parvenu à réduire à 5 microns le diamètre du fil : en Amérique, un constructeur a pu obtenir des fils de 0,5 micron de diamètre, et indique qu'il pourra peut-être parvenir à 0,1 micron. L'emploi de fils aussi fins n'est d'ailleurs pas nécessaire dans les mesures dont il s'agit, car ces mesures portent sur des courants dont l'intensité serait trop considérable pour des fils aussi fins. On emploie le bolomètre dans une branche d'un pont de Wheatstone dans laquelle est placée aussi un milliampèremètre. La branche voisine contient des résistances : les deux branches opposées ont 1 000 ohms de résistances fortement inductives, avec noyaux de fer et revêtements en fils de fer. L'une des diagonales du pont contient une batterie de faible résistance ; l'autre diagonale contient un galvanomètre très sensible ayant une faible résistance ohmique et une forte résistance inductive. La résistance du bolomètre employé est de 20 ohms environ.

En appelant r_1 r_2 r_3 r_4 r_5 r_6 les résistances dans les branches respectives du pont, B la f. é. m. de la batterie, le courant dans la branche du galvanomètre est donné par la formule

$$i_5 = \frac{B(r_2 r_3 - r_1 r_4)}{N}$$

en appelant N la somme des cinq termes suivants :

$$\begin{aligned} N = & r_6 r_5 (r_1 + r_2 + r_3 + r_4) \\ & + r_6 (r_1 + r_3)(r_2 + r_4) \\ & + r_5 (r_1 + r_2)(r_3 + r_4) \\ & + r_1 r_2 (r_3 + r_4) + r_3 r_4 (r_1 + r_2). \end{aligned}$$

La valeur de i_5 dépendant de sept variables, il est difficile d'obtenir une expression simple pour son maximum. On voit, toutefois, que i_5 augmente quand r_5 et r_6 diminuent. Le bolomètre a une résistance de 20 ohms environ (r_2). Les résistances r_1 et r_3 peuvent être aussi grandes que l'on veut. Par exemple, si l'accroissement de résistance du bolomètre, produit par la superposition du courant alternatif, est de 0,1 ohm, la résistance r_2 devient 20,01 ohms, la résistance de la branche adjacente r_4, primitivement égale à celle de la branche r_2, est de 20 ohms. Pour $r_1 = r_3 = 1\,000$ ohms, le coefficient de B dans l'équation ci-dessus est

$$(1\,000 \times 20{,}01) - (1\,000 \times 20) = 10.$$

Si $r_1 = r_3 = 100\,000$, le coefficient de B a pour valeur 1 000, c'est-à-dire est 100 fois plus grand que précédemment. Toutefois, i_5 ne devient pas 100 fois plus grand, car N croît avec r_1 et r_3. Il faut alors, quand on emploie des résistances r_1 et r_3 plus élevées, employer une f. é. m. plus considérable pour que le même courant circule dans la branche du bolomètre. Cette augmentation de f. é. m. augmente aussi la valeur de i_5.

Il est nécessaire de connaître exactement quelle valeur du courant alternatif correspond à chaque accroissement de la résistance du bolomètre. Pour cela il faut tracer au préalable la courbe d'étalonnage, c'est-à-dire la courbe de résistance en ohms en fonction de courant en milliampères. Cet étalonnage peut être fait sur courant continu. L'augmentation et la diminution de résistance sont à peu près instantanées.

R. R.

TABLE MÉTHODIQUE DES MATIÈRES

Théories et Généralités.

Sur quelques expériences déjà connues, considérées au point de vue de la théorie des électrons. — *A. Righi*. 5
Contribution à la théorie de l'arc chantant. — *H.-T. Simon*. 139, 179
Spectre de l'arc du fer à des pressions élevées. *G. Duffield*. 462
Sur le dégagement d'énergie et la résistance apparente de l'étincelle électrique. — *J. Koch*. 142
Contribution à la théorie de la décharge dans les gaz. — *H. Sieveking*. 22
Sur la chute de tension dans la couche positive dans l'hydrogène. — *P.-B. Pentscheff*. 228
Sur le spectre de la lumière de l'azote produit par les rayons du radiotellure. — *B. Walter*. 26
Sur l'effet de doublet dans l'azote et sur les ions positifs. — *W. Hermann*. . . . 420
Méthodes employées pour les mesures relatives aux rayons X et aux rayons provenant de corps radio-actifs. — *H. Bordier*. 303
Nouveau tube pour la production de rayons Röntgen. — *J. Rosenthal*.. 103
Sur la radioactivité des sels de radium. — *B. Boltwood*. 259
Séparation du radium C du radium B. — *F. von Lerch*. 65
Sur la radioactivité des minéraux et des sels de thorium. — *B. Boltwood*. 258
Sur la radio-activité du thorium. — *H.-M. Dadourian*. 226
Sur quelques propriétés du radiothorium. — *O. Hahn*. 102
Sur la région d'ionisation des rayons α du radium. — *O. Hahn*. 378
Sur quelques propriétés des rayons α du radiothorium. — *O. Hahn*. 223
Sur la charge positive portée par une particule α de radium C. — *Soddy*. 459
Sur l'absorption des rayons α et β. — *L. Meitner*.. 460
Sur l'origine des rayons β du thorium et de l'actinium. — *M. Levin*. 301
Sur l'absorption des rayons α du polonium. — *M. Levin*. 301
Observations faites sur les rayons-canal. — *A. Rau*. 102
Observations spectroscopiques sur la réflexion et la dispersion des rayons-canal. — *W. Hermann* et *S. Kinoshita*. 376
Théorie des alliages magnétiques du manganèse. — *Ch. Ed. Guillaume*. 184
Effets de la self-induction dans un cylindre en fer. — *E. Wilson*. 339
Sur les propriétés magnétiques du fer électrolytique. — *C.-F. Burgess* et *A.-H. Taylor*. 182
Phénomènes présentés par le fer sous l'action d'oscillations électriques. — *W.-H. Eccles*. 492
Relation entre la conductibilité électrique et la température pour les corps solides. — *J. Kœnigsberg* et *O. Reichenheim*.. . . 417
Sur la variation de résistance des fils de palladium contenant de l'hydrogène occlus. — *F. Fischer*. 341
Sur l'effet photo-électrique d'une électrode en métal alcalin placée dans l'argon, l'hélium et l'hydrogène. — *Dember*. . . 62
Sur le pouvoir émissif et la température du manchon Auer pour différentes teneurs en cérium. — *H. Rubens*.. 262

Génération et Transformation.

Sur l'utilisation de la force des marées. . . *32*
L'emploi des moulins à vent pour la production d'énergie électrique. *66*
Sur l'utilisation des vapeurs d'échappement. . *40*
Sur le rendement de condenseurs à surface. — *R.-L. Weighton*. 494
Essais de consommation de vapeur effectués à Chemnitz sur une machine à vapeur à quatre cylindres.. . . . . *57*
Sur les clapets de sécurité.. . . . . *57*
Purification de l'eau d'alimentation des chaudières.. . . . . *100*
Machine à vapeur rotative Fritz Egersdörfer.. *90*
La turbine à vapeur, son importance et ses applications. — *A. Parsons*.. . . . *102*
Sur la fixation des aubes des turbines à vapeur. *90*
Turbines Curtis pour l'utilisation des vapeurs d'échappement. *91*
Nouvelle turbine à vapeur radiale à action. — *Kolb*. 263
Les turbines à gaz. — *A. Becq*. . . . 133 et 172
Expériences de réception faites sur un moteur à gaz de Winterthur. *112*
Moteur à combustible liquide à injection système Trinkler. 494
Locomobile à gaz pauvre Dunker. 91
Utilisation des déchets de bois, pour l'alimentation des gazogènes. 91
Sur la réfrigération des moteurs à gaz de forte puissance. 104
Effet des gaz d'échappement des moteurs à gaz sur différents métaux. 185
Sur le calcul de moteurs à quatre temps. . . 103
Appareil pour la mise en parallèle automatique des générateurs triphasés. — *G. Benischke*. 232
Sur l'accouplement élastique des masses tournantes et son influence sur le réglage du moteur. — *P. Ehrlich*. 349
Régulateur de turbines hydrauliques. — *Pirkl*. 381
Sur la marche en parallèle des alternateurs entraînés par des moteurs à gaz. — *Schüler*. 27
Sur les commutatrices. — *K. Klein*.. . . . 30
Sur les commutatrices et les moteurs-générateurs. — *P. Fowler*. 28
Sur les commutatrices shunt ou compound pour le service de traction. — *W.-L. Waters*. 312
Sur les commutatrices en cascade. — *Arnold*. 497
Sur le réglage de la tension de décharge des batteries d'accumulateurs servant pour l'éclairage. — *E.-P. Hollis* et *E.-R. Alexander*. 31

Étude et construction des machines électriques.

Sur le diagramme de Potier en tenant compte de la dispersion. — *Sumec*. 495
Dynamos génératrices à courant continu à grande vitesse et à tension élevée. — *H. M. Hobart*. 143
Sur les machines à pôles de commutation et compensées. — *E. Arnold*. 463
Sur la répartition du flux dans une machine à pôles auxiliaires. — *R. Pohl*. . . . 342
Sur la répartition du flux dans une machine à pôles auxiliaires. — *E. Arnold*. . . . 343
Influence de l'emploi de pôles de commutation sur le dimensionnement des moteurs à courant continu. — *C. H. Bedell*. 345
Sur les enroulements série-parallèle à connexions équipotentielles. — *Arnold*. 186, 234, 266
Sur l'évaluation de l'élévation de température des induits. — *A. Press*. 185
Sur les courants parasites. — *M. B. Field*. 264 et 304
Détermination des pertes produites dans les masses polaires par la denture de l'induit. — *Wall* et *Smith*. 466
Sur la résistance de passage de balais en charbon et de balais formés d'un mélange de charbon et de métal. — *S. Salto*. . 68
Sur la résistance de passage des balais de dynamos. — *E. Arnold*. 382
Sur le coefficient de température du cuivre employé dans les enroulements des machines électriques. — *A. E. Kennelly*. 229
Étude générale de la machine à courants alternatifs. — *J. Perret*. 281
Diagramme général des courants triphasés. — *F. Niethammer*. 481
Sur un nouveau mode de compoundage des alternateurs. — *Edouard Roth*. . 241 et 252

Sur la production et la forme des harmoniques supérieurs dus aux dents des générateurs à courants alternatifs. — *K. Simons*. 230
Sur les harmoniques supérieurs à phase alternante. — *B. Strasser* et *J. Zenneck*. . 385
Théorie de la résonance d'ondes à phase alternante. — *W. Rogowski*. 387
Essais récents des turbo-alternateurs d'Oerlikon. — *Léon Legros*. 121
Alternateur asynchrone. — *G. Faccioli*.. . . 346
Moteur série monophasé Siemens-Schuckert. — *R. Richter*. . . . 69, 105, 149 et 189
Moteur monophasé à pôles saillants. — *Waters*. 110
Sur les moteurs monophasés à collecteur. — *F. Eichberg*. 425
Sur la commutation dans les machines compensées. — *Marius Latour*. 422
Sur le champ magnétique dans le moteur d'induction monophasé. — *A. S. Mac Allister*. 467
Moteur asynchrone monophasé à rotor monophasé. — *A. Courtot*. 401
Sur les pertes dans le fer des moteurs à collecteur à courant alternatif. — *Niethammer*. 146
Calcul d'un moteur à répulsion d'Atkinson. — *F. Creedy*. 41
Méthode de calcul des moteurs à répulsion. — *F. Creedy*.. 161
Sur le courant d'excitation des moteurs d'induction. — *A. S. Mac Allister*. 73
Diagramme du cercle du moteur d'induction monophasé. — *A. S. Mac Allister*. . . 308
Comparaison entre les moteurs diphasés et les moteurs triphasés. — *Mac Cornick*. . 110
Sur l'application de l'aimantation dissymétrique du fer en courant alternatif (transformateur statique doubleur de fréquence). — *C. Léonard* et *L. Weber*. 81
Interrupteur pour bobines d'induction servant à la production de rayons Röntgen. — *Januskiewicz*. 193
Bobine de réactance réglable. — *Gumlich*. . 472
Étude du démarrage d'un appareil de levage entraîné par un moteur électrique à courant continu. — *G. Hacault*. . . 442
BREVETS. 105

Transmission et distribution.

Sur les constantes à employer pour le calcul des câbles au point de vue de l'échauffement. — *J. Teichmüller* et *P. Humann*. 153 et 194
Expériences sur l'échauffement des câbles. 500
Sur les câbles isolés au caoutchouc. — *Langan*. 196
Comparaison entre le système de transmission à courant continu et le système de transmission à courants triphasés. — *Motta*. 152
Détermination de la tension aux points de consommation sans l'emploi de fils pilotes. — *G. Rasch*. 498
Ligne de transmission et sous-station à 60 000 volts (Niagara). 314
Ligne de transmission expérimentale à 100 000 volts. — *K. Wernicke*. 315
Câble Pirelli à 100 000 volts. 316
Sur les parafoudres. — *E. Ballois*. 447
Isolateur Tolusso. *115*
Isolateur Semenza. 498
BREVETS.. . . . . *116*

Installations d'usines génératrices et de réseaux de distribution.

Les installations électriques de la ville de Shaffouse. — *J. Reyval*. 252
Les usines et installations électriques de Saint-Gall. — *A. Solier*. 409
Installations de l'usine de Wangen sur l'Aare. . . . . *56* et *86*
Usine génératrice et sous-station du tramway Alexandrie-Ramleh. *90*
Usine hydro-électrique de la « Pikes Peak C° ». *6*
Usines génératrices de Springfield. *134*
Usine d'Orangeburg.. . . . . *136*
Usine hydro-électrique de la « Animas Power and Water C° ».. . . . . *18*
Usine hydro-électrique d'Albany. *28*
Nouvelle usine génératrice pour les tramways électriques de Londres. *30*
Nouvelle usine génératrice de Brighton. . . *38*
Usine génératrice de New-Rochelle. . . . *64*
Usine hydro-électrique de Baker-City.. . . *66*
Usine hydro-électrique de Winnipeg. . . . *98*
Installation de turbines à vapeur.. . . . . *104*

Quelques installations de moteurs Diesel. . . 7
Installation électrique privée avec moteurs à gaz. 19
Utilisation des gaz des hauts fourneaux. Installations électriques de Portoferrajo. — *A. Solier*. 223
Étude statistique des réseaux de distribution (stations centrales). . . . . . .
(Suite) : Loire-inférieure. 2
— Ille-et-Vilaine.. 2
— Côtes-du-Nord. 4
— Finistère. 26
— Seine-Inférieure. 54
— Somme. 62

Traction.

Installations de traction électrique au Simplon. — *A. Solier*. 486
Tramways électriques à récupération. — *A. Solier*.. 334
Système de commande des trains à unités multiples. — *Harding* et *Clark*. 197
Développement des installations de traction par courant continu à haute tension en Europe. 197
Chemin de fer électrique à contacts superficiels système Krizik (Prague). — *Schwerak*. 351
Sur le poids adhérent des locomotives monophasées. — *Ossanna*. 350
Avantages et inconvénients des différents systèmes de freins.. 151
Installation de traction par courant monophasé sur le Richmond and Chesapeake Bay Railroad. 42
Équipement monophasé du chemin de fer d'Anderson. 43
Chemins de fer électrique de Spokane. . . . 146
Tramways de Wellington (N. Zélande). . . 146
Chemin de fer électrique à crémaillère de Brunnen à Morschach. — *A. Solier*. . 97
Locomotive électrique de 2 200 chevaux pour le New-York Central Railroad. . . 34
L'équipement électrique du Great Western Railway. 68
Chemins de fer électriques des environs de Stuttgart. 19
Les lignes de transmission et le mode d'alimentation du troisième rail du Long Island Railroad. 43
Emploi des automotrices sur les voies ferrées américaines. 23
Matériel roulant du Long Island Ry. . . . 148
Voiture pour l'inspection du tunnel du Simplon. 148
Locomotive à accumulateurs employé à la construction du métropolitain de Londres. 351
Automotrice funéraire électrique. 150
Les omnibus électriques à Londres. — *R. Lacau*. 56
Comparaison entre les tramways électriques et les omnibus automobiles. 35
Suspension caténaire des lignes de trôlet. . . 351
Appareil Everett Edgcumbe pour la vérification de l'isolement des lignes de trôlet. . 352
Méthode pour surveiller d'une façon permanente les courants vagabonds. — *W. Kohlrausch*. 198
Les installations électriques du canal Teltow.. 122
Réglementation relative aux moteurs de traction à courant continu. 138
Brevets.. 154

Oscillations hertziennes. Télégraphie et téléphonie sans fil.

Contribution à la théorie de l'excitateur de Hertz et mesures de radiation faites sur des résonateurs. — *C. Schæfer* et *M. Laugwitz*. 110
Sur la résonance avec des condensateurs imparfaits. — *G Benischke*. 352
Sur la télégraphie sans fil. — *R.-A. Fessenden*. 74
Sur l'interférence en télégraphie sans fil. — *Fessenden*. 472
Télégraphie sans fil dans une direction unique (fin). — *F. Braun*. 33
Note sur la théorie des oscillateurs dissymétriques. — *J.-A. Fleming*. 270
Sur les détecteurs d'ondes électriques à gaz ionisés. — *C. Tissot*. 354
Commande électrique à distance par les ondes hertziennes. — *Devaux*. 274
Nouvelles communications par télégraphie sans fil. 44
Installations de télégraphie sans fil en Angleterre. . . . . 71 et 92

Télégraphie et téléphonie.

Sur l'extension des réseaux téléphoniques en Allemagne. 77
Les télégraphes et les téléphones en Italie. . 58
Relais téléphonique. — *J. Trowbridge*. . . . 77
La flotte télégraphique du monde. 46

Éclairage.

Mesures faites sur l'arc au mercure fonctionnant avec une forte pression de vapeur. — *R. Küch* et *T. Retschinsky*. . . . 211
Sur les lampes Bastian à vapeur de mercure. 318
Expériences faites sur une lampe à vapeur de mercure dans un champ magnétique. — *W. Schenkel*. 321
Sur l'arc au mercure et quelques problèmes de photométrie. — *F. Laporte*. . . . 276
Note sur les lampes à arc différentielles à courant continu et leurs principaux montages. — *A. Foulhouze* et *L. Guedeney*. 18 et 50
Les charbons électriques. — *J. Escard*. . . 363
Influence de la courbe de tension sur les lampes à arc. — *C. Zorawski*. 158
Lampes Osram. 429
Sur les nouvelles lampes à incandescence. — *Teichmüller*. 502
Sur les lampes à filament métallisé. — *Willcox*. 503
Sur les lampes à magnétite. — *Fleming*. . . 37
Emploi de lampes à magnétite en série pour l'éclairage public. — *W.-S. Barstow*. . 430
Sur la durée économique des lampes à incandescence. — *L.-W. Wild*. 238
Sur le noircissement des lampes à incandescence et son emploi pour la détermination de la durée d'utilisation. — *Cl.-H. Sharp*. 354
Sur la consommation et l'intensité lumineuse des lampes Edison. — *R. Lucas*. . . 37
Sur le facteur de réduction sphérique des lampes au tantale. — *C.-H. Sharp*. . . 156
Sur la température de la lampe Nernst. — *L.-W. Hartman* 239
Sur l'éclat de corps noirs incandescents. — *W. Nernst*. 112
L'éclairage électrique des trains : systèmes Vickers-Hall, Dowie, Consolidated Railway, Electric Light C°, Finney Mac Elroy, Bliss. — *R. de Valbreuze*. . 293
Sur l'éclairage des rues. — *L. Bloch*. . . . 237
Sur l'éclairement produit par deux sources lumineuses. — *Benton*. 158
Expériences faites avec des appareils permettant de déterminer l'intensité sphérique moyenne et l'intensité hémisphérique moyenne. — *B. Monasch*. . 316, 356 et 391
Sur le photomètre sphérique d'Ulbricht. — *M. Corsepius*. 78
Sur quelques causes d'erreur en photométrie. — *L.-W. Wild*. 274
Comparaison entre les unités photométriques française, allemande et anglaise. . . 318
BREVETS. 155

Éléments primaires et accumulateurs.

Perfectionnement à la fabrication des plaques d'accumulateurs. — *F.-E. Polzeniusz* et *R.-B. Goldschmidt*. 159
Plaque d'accumulateur. — *Th.-A. Edison*. . 159
Mode de traitement des accumulateurs alcalins. — *Th.-A. Edison*. 159
Matière active pour accumulateurs. — *Th.-A. Edison*. 159
Electrodes positives et négatives pour accumulateurs alcalins. — *Ch. Humbert*. . 159
Plaque d'accumulateur. — *F.-F. Kelley*. . . 506
Plaque d'accumulateur. — *W.-L. Silvey*. . . 506
Accumulateur. — *W.-H. Palmer*. 503
Perfectionnements aux accumulateurs. — *Akkumulatorenfabrik Gesellschaft*. 504
Accumulateur. — *J.-R. Macmillan*. 504
Matrice pour la fabrication des plaques Planté. — *A.-I. Blanchon*. 504
Perfectionnements aux plaques. — *A. Schauschieff*. 504

Accumulateur. — *O. Garreau*. 504
Perfectionnements aux éléments pour traction. — *W.-N. Caton*. 504
Plaque. — *O.-H. Fay*. 505
Perfectionnements aux accumulateurs. — *E.-V. Stebbins*. 505
Accumulateur à électrodes cylindriques. — *L.-A. Génard*. 505
Électrode pour éléments de poche. — *Schaeffer*. 505
Procédé pour fabriquer les électrodes au moyen de bandes de plomb. — *Gondrand* et *Célestre*. . . . .

Électrochimie et électrométallurgie.

Expression de la période de vibration ionique et électronique et ses conséquences. — *G. Rosset*. . . . . . 84, 167 et 211
Longueur d'onde et vitesse de propagation des phénomènes électriques. — *G. Rosset* . 361
Progrès réalisés en 1905 dans l'industrie électrochimique et électrométallurgique. — *F.-S. Spiers*. 114
Electrode tournante pour l'analyse électrochimique. — *F.-M. Perkin*. 116
Electrolyse de solutions diluées d'acides ou d'alcalis à de faibles potentiels. Dissolution du platine à l'anode avec du courant continu. — *G. Senter*. . . . 436
Procédé électrolytique pour récupérer l'étain. — *Pusch*. 80
L'équivalent électrochimique de l'argent. — *K.-E. Guthe*. 115
Sur la production d'ozone dans l'oxygène et l'air atmosphérique sous l'effet de la décharge silencieuse continue entre électrodes métalliques. — *E. Warburg* et *G. Leithauser*. 474
Influence de l'humidité et de la température sur la formation d'ozone dans l'oxygène et dans l'air atmosphérique. — *E. Warburg* et *G. Leithauser*. 476
Sur la galvanisation électrique. 437
La sidérurgie électrothermique. — *E. Stassano* . . . . 395 et 430
Four électrique pour le traitement du fer. — *Cohn*. 400

Méthodes et appareils de mesures.

Sur les pyromètres thermo-électriques. — *E. Ballois* 372
Appareil enregistrant la vitesse de rotation et le degré d'uniformité des machines. — *F. Lux*. 198
Nouvel appareil de mesure pour les courants alternatifs de faible intensité. — *W. Voege*. 198
Sur la mesure des faibles courants de haute fréquence. — *B. Gati* 507
Mesure des courants alternatifs de faible intensité. — *Wertheim-Salomonson*. . . . 240
Mesure directe du temps. — *Steidle*. . . . 478
Appareils de mesure enregistreurs Westinghouse. 160
Emploi, dans différentes méthodes de mesure, de l'interrupteur à jet de mercure comme commutateur. — *Zenneck*. . . 200
Electromètre à quadrants transportable avec enregistrement photographique. — *Elster* et *Geitel*. 319
Petit électromètre sensible. — *Paschen*.. . . 439
Influence de la fréquence et de la forme d'ondes sur les voltmètres électrostatiques. — *G. Benischke*. 320
Sur les voltmètres électrostatiques. Recherche expérimentale de l'influence de la durée de charge et de décharge sur les indications de l'électromètre. — *H. Fischer*. 39
Sur les ampère-heure-mètres avec induit tournant. — *E. Beckmann*. 277
Watt-heures-mètres système Stanley. — *Faccioli*. 439
Mesure de la résistance des charbons au moyen de deux contacts en mercure — *J. Kuhn*. 437
Méthode pour mesurer la résistance de passage d'une prise de terre. — *A. Christenson*. 440
Mesures électriques de la température. — *Northrup*. 117
Sur un thermomètre électrique à résistance. — *Bruger* 118
Mesure du pouvoir calorifique du charbon. — *J. Holliday*. 38
Calorimètre à alcool pour les essais de combustibles. — *W.-M. Wallace*. . . . 39

Divers.

Installations électriques des houillères d'Aberdare. 8
Équipement électrique de l'hippodrome de New-York. 9
Applications de roulements à billes D. W. F. aux volants de machines d'extraction. . 10
Influence du polissage sur les propriétés isolantes du bois. — *Wernicke*. 120
Expériences comparatives effectuées sur des courroies et sur des câbles de transmission. 92
Création du comité d'électricité prévu par la loi du 15 juin 1906. 122
L'Industrie et les Universités. — *G. Lippmann*. 74
Brevets délivrés en Autriche. 93, 142
— — en Allemagne. . . 96, 104, 143

Expositions et concours.

Exposition internationale de l'industrie minière à Londres. 14
L'Exposition de Nuremberg. 50
L'électricité à l'Exposition générale de l'Hygiène, à Vienne. 114
Congrès de Milan de l'Union internationale de tramways et chemins de fer d'intérêt local. 83
Concours pour la production et la distribution de l'énergie. 108
Concours international ouvert par l'Association des Industriels de France pour une pile primaire et un accumulateur. . . . 110

Renseignements économiques et commerciaux.

Modification aux tarifs des douanes. 144
Résultats financiers de la régie municipale à Genève (1905). 128
Concessions et projets. 11, 60, 118
Constitution de nouvelles sociétés. . . 12, 35, 118
Avis. 12, 35, 143
Brevets à céder. 12, 96, 108, 119, 130

Nécrologie et Bibliographie.

M. Georges Montefiore. 14
M. Paul Drude. 50
Wissenswertes aus dem Dynamobau fur Installateure, par *E. Schulz*. 24
Die Vorgänge in Ein-und Mehrphasengeneratoren, par *J. Rezelmann*. 36
Turbo-dynamos und verwandte Maschinenbau, par *F. Niethammer*. 84
Lichtstrahlung und Beleuchtung, par *P. Högner*. 120
Stromverteilungs systeme und Berechnumg elektrischer Leitungen, par *Ph. Häffer*. 120
Elektrolytische Alkalichloridzerlegung mit flüssigen Metallkathoden, par *R. Lucion*. 120
L'électricité industrielle mise à la portée de l'ouvrier, par *E. Rosenberg*, traduit de l'allemand par *A. Mauduit*. 24
Règles normales de l'association des électriciens allemands pour la comparaison et l'essai des machines et transformateurs électriques, par *G. Dettmar*, traduit de l'allemand par *Loppé* et *Thouvenot*. . . 36
Report of the Electric Railway Test Commission to the President of the Louisiana Purchase Exposition. 47
Traité de Physique, par *O.-D. Chwolson* (seconds fascicules des tomes I et II). Traduit par *F. Davaux*. 131
Étude de la résonance des systèmes d'antennes dans la télégraphie sans fil, par *C. Tissot*. 35
Les piles sèches et leurs applications, par *A. Berthier*. 119
L'équilibre des fils électriques, par *A. Pillonel*. 120
Les mathématiques et la médecine, par *G.-H. Niewenglowski*. 48
Dictionnaire des termes techniques, par *H. de Graffigny*. 132
Motori a gaz, par *Calzavera*. 60
I motori ad esplosione a gas luce e gas povero, par *F. Laurenti*. 60

TABLE DES NOMS D'AUTEURS

A

ACCUMULATORENFABRIK A. G. — Perfectionnements aux accumulateurs. 504
ALEXANDER (E.-R.). — Voir *Hollis*.
ARNOLD (E.). — Enroulements induits série parallèle avec connexions équipotentielles. 186, 266
Sur les machines à pôles de commutation et compensées. 463
Sur la répartition du flux dans une machine à pôles auxiliaires. 343
Sur la résistance de passage des balais de dynamos. 382
Sur les commutatrices en cascade . . 497

B

BALLOIS (E.). — Sur les pyromètres thermoélectriques. 372
Sur les parafoudres. 447
BARSTOW (W.-S.). — Emploi de lampes à magnétite en série pour l'éclairage public. 430
BECKMANN (E.). — Sur les ampère-heures-mètres avec induit tournant. 277
BECQ (A.). — Les turbines à gaz. . . 133 et 172
BEDELL (C.-H.). — Influence de l'emploi de pôles de commutation sur le dimensionnement des moteurs à courant continu. 345
BELTWOOD (B.). — Sur la radio-activité des sels de radium. 259
BENISCHKE (G.). — Appareil pour la mise en parallèle automatique des générateurs triphasés.. 232
Sur la résonance avec des condensateurs imparfaits. 352
Influence de la fréquence et de la forme d'ondes sur les voltmètres électrostatiques.. 320
BENTOM. — Sur l'éclairement produit par deux sources lumineuses. 158
BLANCHON. — Matrice pour fabriquer les plaques d'accumulateurs.. 504
BLOCH (L.). — Sur l'éclairage des rues.. . . 237
BOLTWOOD (B.). — Sur la radio-activité des minéraux et des sels de thorium. . . 258
BORDIER (H.). — Méthodes employées pour les mesures relatives aux rayons X et aux rayons provenant de corps radioactifs. 303
BRAUN (F.). — Télégraphie sans fil dans une direction unique. 33
BRUGER. — Sur un thermomètre électrique à résistance. 118
BURGESS (C.-F). — Sur les propriétés magnétiques du fer électrolytique.. 182

C

CATON (W.-N.). — Accumulateur. 504
CELESTRE (H.). — Plaque d'accumulateur. . 505
CHRISTENSON (A.). — Méthode pour mesurer la résistance de passage d'une prise de terre. 440
CLARCK. — Voir *Harding*.
COHN. — Four électrique pour le traitement du fer.. 400
CORSEPIUS (M.). — Sur le photomètre sphérique d'Ulbricht. 78
COURTOT (A.). — Moteur asynchrone monophasé à rotor monophasé. 401
CREEDY (F.). — Calcul d'un moteur à répulsion d'Atkinson. 41
Méthode de calcul des moteurs à répulsion. 161

D

DADOURIAN (H.-M.). — Sur la radio-activité du thorium. 226
DEMBER. — Sur l'effet photo-électrique d'une

électrode en métal alcalin placée dans l'argon, l'hélium et l'hydrogène. . . 62
DEVAUX. — Commande électrique à distance par les ondes hertziennes. 274
DUFFIELD (G.). — Spectre de l'arc du fer à des pressions élevées. 462

E

ECCLES (W.-H.). — Phénomènes présentés par le fer sous l'action d'oscillations électriques. 492
EDISON (Th.-A.). — Plaque d'accumulateur. . 159
Mode de traitement des accumulateurs alcalins. — Électrodes positives et négatives pour accumulateurs alcalins. . 159
EHRLICH (P.). — Sur l'accouplement élastique des masses tournantes et son influence sur le réglage du moteur.. 349
EICHBERG (Fr.). — Sur les moteurs monophasés à collecteur.. 424
ELSTER et GEITEL. — Électromètre à quadrants transportable avec enregistrement photographique.. 319
ESCARD (J.). — Les charbons électriques. . . 363

F

FACCIOLI (G.). — Alternateurs asynchrones. . 346
Watt-heures-mètres système Stanley. 439
FAY (O.-H.). — Plaque d'accumulateur. . . 505
FESSENDEN (R.-A.). — Sur la télégraphie sans fil. 74
Sur l'interférence en télégraphie sans fil. 472
FIELD (M.-B.). — Sur les courants parasites. 264 et 305
FISCHER (F.). — Sur la variation de résistance des fils de palladium contenant de l'hydrogène occlus.. 341
FISCHER (H.). — Sur les voltmètres électrostatiques. Recherches expérimentales de l'influence de la durée de charge et de décharge sur les indications de l'électromètre.. 39
FLEMING (J.-A.). — Note sur la théorie des oscillateurs dissymétriques. 270
Sur les lampes à magnétite.. . . . 37
FOULHOUZE (A.) et GUEDENEY (L.). — Notes sur les lampes à arc différentielles à courant continu et leurs principaux montages . . . . 18 et 50
FOWLER (P). — Sur les commutatrices et les moteurs générateurs. 28

G

GARREAU (O.-A). — Accumulateur. 504
GATI (B.). — Sur la mesure des faibles courants de grande fréquence. 507
GEITEL. — Voir *Elster*.
GENARD (L.-A.). — Accumulateur. 505
GOLDSCHMIDT (R.-B.). — Voir *Polzeniusz*.
GONDRAND (F.). — Plaque d'accumulateur. . . 505
GUILLAUME (Ch.-Ed.). — Théorie des alliages magnétiques du manganèse. 184
GUMLICH. — Bobine de réactance réglable. . 472
GUTHE (K.-E.). — L'équivalent électrochimique de l'argent. 115

H

HACAULT (G.). — Étude du démarrage d'un appareil de levage entraîné par un moteur électrique à courant continu. . . 442
HAHN (O.). — Sur quelques propriétés du radiothorium. 102
Sur quelques propriétés des rayons α du radiothorium. 223
Sur la région d'ionisation des rayons de l'actinium. 378
HARDING et CLARCK. — Système de commande des trains à unités multiples. . . . 197
HARTMAN (L.-W.). — Sur la température de la lampe Nernst. 239
HERMANN (W.). — Sur l'effet de doublet dans l'azote et sur les ions positifs. . . . 420
HERMANN (W.) et KINOSHITA (S.). — Observations spectroscopiques sur la réflexion et la dispersion des rayons-canal. . . 376
HOBART (H.-M.). — Dynamos génératrices à courant continu à grande vitesse et à tension élevée. 143
HOLLIDAY (J.). — Mesure du pouvoir calorifique du charbon. 38
HOLLIS (E.-P.) et ALEXANDER (E.-R.). — Sur le réglage de la tension de décharge des batteries d'accumulateurs servant pour l'éclairage. 31
HUMANN (P.). — Voir *Teichmuller*.
HUMBERT (Ch.). — Électrodes positives et négatives pour accumulateurs alcalins. . 159

J

Januskiewicz. — Interrupteur pour bobines d'induction servant à la production de rayons Röntgen 193

K

Kelley (F.-T.). — Plaque d'accumulateur. . 506
Kennelly (X.-E.). — Sur le coefficient de température du cuivre employé dans les enroulements des machines électriques. 229
Kinoshita. — Voir *Hermann*.
Klein (K.). — Sur les commutatrices. . . . 30
Koch (J.). — Sur le dégagement d'énergie et la résistance apparente de l'étincelle électrique 142
Kœnigsberg (J.) et Reichenheim (O.). — Relation entre la conductibilité électrique et la température pour les corps solides. 417
Kohlrausch (W.). — Méthode pour surveiller d'une façon permanente les courants vagabonds. 198
Kolb. — Nouvelle turbine à vapeur radiale à action.. 263
Küch (R.) et Retschinsky (T.). — Mesures faites sur l'arc au mercure fonctionnant avec une forte pression de vapeur. . 211
Kuhn (J.). — Mesure de la résistance des charbons au moyen de deux contacts en mercure. 437

L

Lacau (R.). — Les omnibus électriques à Londres. 56
Langan. — Sur les câbles isolés au caoutchouc. 196
Laugwitz (M.). — Voir *Schaefer*.
Laporte (F.). — Sur l'arc au mercure et quelques problèmes de photométrie. . . 276
Latour (M.). — Sur la commutation dans les machines compensées 422
Legros (L.). — Essais récents de turbo-alternateurs d'Oerlikon.. 121
Leithauser (G.). — Voir *Warburg*. . . . .
Léonard (C.) et Weber (L.). — Sur l'application de l'aimantation dissymétrique du fer en courant alternatif. 81
Lerch (F. von). — Séparation du radium C du radium B.. 65
Levin (M.). — Sur l'origine des rayons β du thorium et de l'actinium. 301
Sur l'absorption des rayons α du polonium. 301
Lucas (R.). — Sur la consommation et l'intensité lumineuse des lampes Edison.. . 37
Lux (F.). — Appareil enregistrant la vitesse de rotation et le degré d'uniformité des machines.. 198

M

Mac Allister (A. S.). — Sur le courant d'excitation des moteurs d'induction.. . . 73
Diagramme du cercle du moteur d'induction monophasé. 308
Sur le champ magnétique dans le moteur d'induction monophasé.. . . . 467
Mac Cornick. — Comparaison entre les moteurs diphasés et les moteurs triphasés. 110
Mac Millan (J.-R.). — Accumulateur. . . . 504
Meitner (L.). — Sur l'absorption des rayons α et β. 460
Monasch (B.). — Expériences sur la détermination de l'intensité lumineuse sphérique ou hémisphérique moyenne. 317, 356 et 391
Motta. — Comparaison entre le système de transmission à courant continu et le système de transmission à courants triphasés.. 152

N

Nernst (W.). — Sur l'éclat de corps noirs incandescents. 112
Niethammer (F.). — Sur les pertes dans le fer des moteurs à courant alternatif. . . 146
Diagramme général des courants triphasés. 481
Northrup. — Mesures électriques de la température. 117

O

Ossanna. — Sur le poids adhérent des locomotives monophasées.. 350

P

Palmer (W.-H.). — Accumulateur. 503
Paschen. — Petit électromètre sensible. . . 439
Pentscheff (P.-B.). — Sur la chute de tension

dans la couche positive dans l'hydrogène. 228
PERKIN (F.-M.). — Électrode tournante pour l'analyse électrochimique. 116
PERRET (J.). — Étude générale de la machine à courants alternatifs. 281
PIRKL. — Régulateur de turbines hydrauliques. 381
POHL (R.). — Sur la répartition du flux dans une machine à pôles auxiliaires. . . 342
POLZENIUSZ (F.-E.) et GOLDSCHMIDT (R.-B.). — Perfectionnement à la fabrication des plaques d'accumulateurs. 159
PRESS (A.). — Sur l'évaluation de l'élévation de température des induits. 185
PUSCH. — Procédé électrolytique pour récupérer l'étain. 80

R

RASCH (G.). — Détermination de la tension aux points de distribution sans l'emploi de fils pilotes. 498
RAU (A.). — Observations faites sur les rayons-canal. 102
RETSCHINSKY (T.). — Voir *Küch*.
REYVAL (J.). — Les installations électriques de la ville de Schaffouse. 258
RICHTER (R.). — Moteur série monophasé Siemens-Schuckert. . . 69, 105, 149 et 189
RIGHI (A.). — Sur quelques expériences déjà connues considérées au point de vue de la théorie des électrons. 5
ROGOWSKI (W.). — Théorie de la résonance d'ondes à phase alternante. 387
ROSENTHAL (J.). — Nouveau tube pour la production de rayons Röntgen. 103
ROSSET (G.). — Expression de la période de vibration ionique et électronique et ses conséquences. . . . . . 84, 167 et 211
Longueur d'onde et vitesse de propagation des phénomènes électriques. . 361
ROTH (Édouard). — Sur un nouveau mode de compoundage des alternateurs. . . . 252
RUBENS (H.). — Sur le pouvoir émissif et la température du manchon Auer pour différentes teneurs en cérium. . . . 262

S

SALTO (S.). — Sur la résistance de passage de balais au charbon et de balais formés d'un mélange de charbon et de métal. . 68
SCHAEFFER (F.). — Accumulateur. 506
SCHAEFER (C.) et LAUGWITZ (M.). — Contribution à la théorie de l'excitateur de Hertz et mesures de radiation faites sur des résonateurs. 110
SCHAUSCHIEFF (A.) — Plaque d'accumulateur. . 504
SCHENKEL (W.). — Expériences faites sur une lampe à vapeur de mercure dans un champ magnétique.. 321
SCHOLTES. — Avantages et inconvénients des différents systèmes de freins. . . . *151*
SCHÜLER — Sur la marche en parallèle des alternateurs entraînés par des moteurs à gaz. 27
SCHWERAK. — Chemin de fer électrique à contacts superficiels, système Krizik. . . 351
SENTER (G.) — Électrolyse de solutions diluées d'acides ou d'alcalis à de faibles potentiels. — Dissolution du platine à l'anode avec du courant continu. . . . 436
SHARP (Cl.-H.). — Sur le facteur de réduction sphérique des lampes au tantale. . . 156
Sur le noircissement des lampes à incandescence et son emploi pour la détermination de la durée d'utilisation. . 354
SIEVEKING (H.). — Contribution à la théorie de la décharge dans les gaz.. 22
SILVEY (W.-L.). — Plaque d'accumulateur. . 506
SIMON (H.-T.). — Contribution à la théorie de l'arc chantant. . . . . 139 et 179
SMITH. — Voir *Wall*.
SODDY. — Sur la charge positive portée par une particule α de radium C. 459
SOLIER (A.). — Chemin de fer électrique à crémaillère de Brunnen à Morschach. . . 97
Utilisation du gaz de hauts fourneaux : Installations électriques de Porto-Ferrajo. 223
Installations de traction électrique au Simplon. 486
Tramways électriques à récupération. 334
Les usines et installations électriques de Saint-Gall. 409
SPIERS (F.-S.). — Progrès réalisés en 1905 dans l'industrie électrochimique et électrométallurgique. 114
STASSANO (E.). — La sidérurgie électrothermique. . . . . 295 et 430
STEBBINS (E.-V.). — Accumulateur. 505
STEIDLE (H.-C.). — Sur la mesure directe du temps. . . . . 478 et 506
STRASSER (B.) et ZENNECK (J.). — Sur les harmoniques supérieurs à phase alternante. 385

SUMEC. — Sur le diagramme de Potier en tenant compte de la dispersion. . . . 495

T

TEICHMÜLLER (J.). — Sur les nouvelles lampes à incandescence. 502

TEICHMÜLLER (J.) et HUMANN (P.). — Sur les constantes à employer pour le calcul des câbles au point de vue de l'échauffement. . . . . 153 et 194

TROWBRIDGE (J.). — Relais téléphoniques. . . 77

V

VOEGE (W.). — Nouvel appareil de mesure pour les courants alternatifs de faible intensité 198

VALBREUZE (R. DE). — Nouveaux systèmes pour l'éclairage électrique des trains. . . 293

W

WALL et SMITH. — Détermination des pertes produites dans les masses polaires par la denture de l'induit. 466

WALLACE (W.-M.). — Calorimètre à alcool pour les essais de combustibles. . . 39

WALTER (B.). — Sur le spectre de la lumière de l'azote produit par les rayons du radiotellure 26

WARBURG (E.) et LEITHAUSER (G.). — Sur la production d'ozone dans l'oxygène et l'air atmosphérique sous l'effet de la décharge silencieuse continue entre électrodes métalliques. 474
Influence de l'humidité et de la température sur la formation d'ozone dans l'oxygène et dans l'air atmosphérique. 476

WATERS (W. L.). — Moteur monophasé à pôles saillants. 110
Sur les commutatrices shunt ou compound pour le service de traction. . . 312

WEBER (L.). — Voir *Léonard*.

WEIGHTON (W.-L.). — Sur le rendement des condenseurs à surface 494

WERNICKE (K.). — Influence du polissage sur les propriétés isolantes du bois. . . 120
Ligne de transmission expérimentale à 100 000 volts. 315

WERTHEIM-SALOMONSON. — Mesure des courants alternatifs de faible intensité. . . . 240

WILD (L.-W.). — Sur la durée économique des lampes à incandescence.. . . . 238
Sur quelques causes d'erreur en photométrie. 274

WILLCOX (F.). — Sur les lampes à filament métallisé. 503

WILSON (E.). — Effets de la self-induction dans un cylindre en fer. 339

Z

ZENNECK (J.). — Emploi, dans différentes méthodes de mesure, de l'interrupteur à jet de mercure comme commutateur. . 200
Voir *Strasser*.

ZORAWSKI (C.). — Influence de la courbe de tension sur les lampes à arc. . . . 158

CHARTRES. — IMPRIMERIE DURAND, RUE FULBERT.

Le Gérant : J.-B. NOUET.